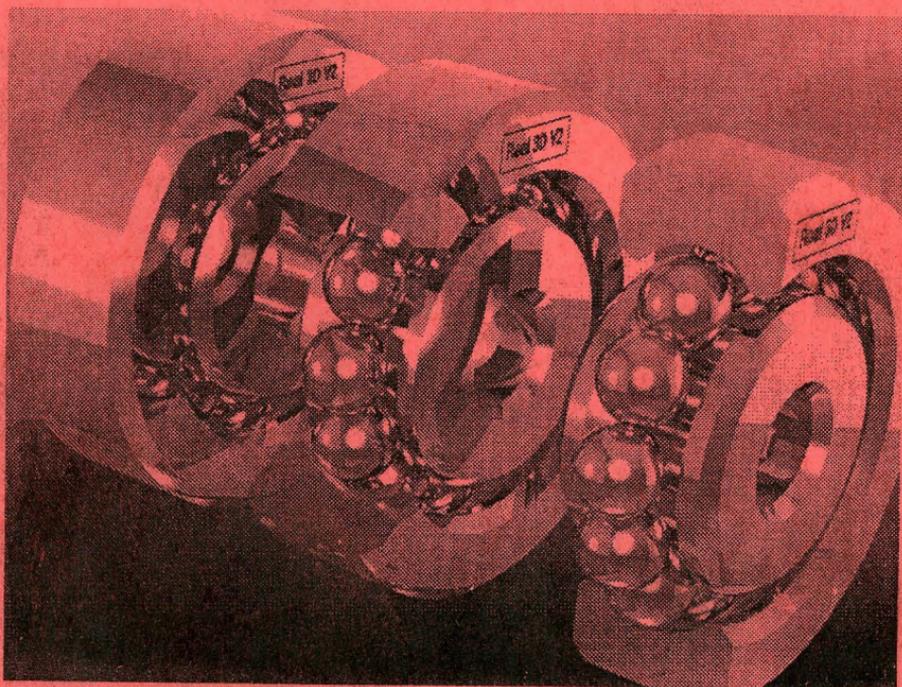


А.В. Королев А.М. Чистяков О.Ю. Давиденко

# НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Часть 3

Технология многобрускового  
формообразующего суперфиниширования  
с локализацией контакта инструмента  
и обрабатываемой поверхности



1997

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации

**Саратовский государственный технический университет**

**А.В. КОРОЛЕВ    А.М. ЧИСТЯКОВ    О.Ю. ДАВИДЕНКО**

**НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

**Часть 3**

**Технология многобрускового формообразующего  
суперфиниширования с локализацией контакта  
инструмента и обрабатываемой поверхности**

**Саратов 1997**

УДК 621.75

К66

К66

Королев А.В., Чистяков А.М., Давиденко О.Ю. **НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.** Часть 3. Технология многобрускового формообразующего суперфиниширования с локализацией контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997.-152 с.

ISBN 5-7433-0428-9

Книга продолжает серию публикаций в области новых прогрессивных технологий машиностроительного производства, созданных научной школой технологов-машиностроителей СГТУ в творческом содружестве со специалистами Саратовского подшипникового завода.

Изложены результаты исследований различных способов осуществления многобрускового суперфиниширования, показана их технологическая эффективность и область рационального использования. Даны практические рекомендации по применению технологии многобрускового суперфиниширования в производстве прецизионных изделий типа подшипников качения. Приводится описание технологического оборудования, изготавливаемого для многобрускового суперфиниширования, показан экономический эффект от использования оборудования в производстве подшипников.

Для широкого круга разработчиков новой техники, инженерно-технических работников машиностроительных заводов, преподавателей и студентов технических вузов.

Табл. 10. Ил. 58. Библиогр.: 63 назв.

Рецензенты:

доктор технических наук профессор Б.М. Бржозовский  
(Саратовский государственный технический университет);  
кандидат технических наук профессор В.Т. Гуськов  
(декан Саратовского филиала МИИТ)

К  $\frac{2704000000 - 15}{С97(03) - 97}$

© А.В. Королев  
А.М. Чистяков

О.Ю. Давиденко, 1997

ISBN 5-7433-0428-9

## ВВЕДЕНИЕ

Качество и надежность машин и механизмов в значительной степени определяются надежностью опор качения. Как показывают статистические данные, 40% оборудования выходит из строя по причине неудовлетворительной работы подшипников. Поэтому существует проблема повышения эксплуатационных характеристик подшипников качения, которые во многом зависят от точности геометрической формы и качества рабочих поверхностей их деталей, окончательно формируемых на заключительной стадии обработки.

Наиболее эффективным методом окончательной абразивной обработки ответственных поверхностей деталей является суперфиниширование. Однако существующие способы суперфиниширования, отличаясь рядом преимуществ, имеют серьезные недостатки, основные из которых - низкая производительность съема припуска, обусловленная затухающим процессом резания, ограниченные формообразующие возможности, заключающиеся в неспособности не только формировать требуемые геометрические параметры профиля обрабатываемой поверхности, но и сохранять его точность, достигнутую на предшествующих операциях. Так, при суперфинишировании, например, роликовых дорожек колец с бортами профиль обрабатываемой поверхности приобретает вогнутую форму, что приводит к резкому снижению долговечности и грузоподъемности роликоподшипников. Кроме того, традиционные методы суперфиниширования обладают низким уровнем универсальности и технологической гибкости. Для обработки различных по форме профиля поверхностей требуется специальное технологическое оборудование, что крайне затрудняет использование процесса суперфиниширования в условиях гибких интегрированных производств.

Как показывают исследования отечественных и зарубежных ученых, весомым резервом увеличения эксплуатационных характеристик опор качения является оптимизация геометрической формы профиля рабочих поверхностей их деталей. Однако прогрессивные конструкции

профилей, очерченных либо кривыми переменного радиуса, либо сочетанием различных линий, несмотря на высокую эффективность, не находят применения в промышленности в результате отсутствия на заключительных стадиях обработки надежных способов профилирования, пригодных для использования в современных производственных условиях. В этой связи решение проблемы создания прогрессивных технологий и оборудования для брусковой обработки рабочих поверхностей деталей на основе фундаментальных исследований закономерностей формообразования обрабатываемых заготовок позволит обеспечить экономичное и стабильное получение высокого качества деталей подшипников качения.

В данной (3-й) части публикуемой серии приводятся результаты исследований по созданию высокоэффективных универсальных технологий и оборудования для доводки рабочих поверхностей колец подшипников с повышенной производительностью, технологической гибкостью и широкими формообразующими возможностями.

# 1. МНОГОБРУСКОВОЕ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ПЕРЕСЕЧЕНИЕМ ОСЕЙ ВРАЩЕНИЯ ЗАГОТОВКИ И ИНСТРУМЕНТА

## 1.1. Кинематика перемещения инструмента

Как известно, для традиционных методов суперфиниширования характерно осциллирующее движение инструмента [1-48], траектория которого соответствует профилю обрабатываемой поверхности [2, 6, 9, 15, 17-21]. Так, при обработке поверхностей с прямолинейной образующей абразивный брусок совершает возвратно-поступательное движение вдоль обрабатываемого профиля. При доводке поверхностей типа желобов колец шарикоподшипников брусок совершает осциллирующее движение вокруг оси, проходящей через центр симметрии обрабатываемого желоба. Обработка иных по форме поверхностей также осуществляется осциллирующим инструментом, траектория движения которого определяется формой профиля обрабатываемой поверхности.

Известно, что частота осцилляции инструмента при брусковой обработке в значительной степени определяет ее производительность [18, 37, 43]. С увеличением частоты осцилляции брусков увеличивается производительность обработки, возрастает величина снимаемого припуска, а значит, появляется возможность исправления геометрических погрешностей предшествующей обработки в пределах снимаемого припуска. Однако, с другой стороны, увеличение частоты осцилляции инструмента приводит к возникновению дополнительной вибрации системы СПИД, что оказывает крайне отрицательное влияние на точностные и качественные показатели обработки. Величина частоты и амплитуды осцилляции инструмента в процессе суперфиниширования ограничивается возможностями современных механических или гидравлических вибраторов, а также конструктивными особенностями

технологического оборудования. Таким образом, наличие осциллирующих движений инструмента в значительной степени ограничивает эффективность брусковой обработки традиционными методами, снижает ее технологические возможности.

Методы профилирующей многобрусковой доводки основаны на принципиально ином подходе к условиям контактирования инструмента и заготовки в процессе обработки, которые обеспечиваются соответствующей кинематикой перемещения инструмента по обрабатываемой поверхности.

Рассмотрим процесс профилирующей доводки наружной поверхности вращения. Ось инструментальной головки 1 (рис. 1.1) наклонена под углом  $\alpha$  к оси заготовки 2. Абразивные бруски 3 прижимаются к обрабатываемой поверхности с постоянной силой  $P$ . Головка вращается с частотой  $n_r$ , заготовка - с частотой  $n_d$ .

Введем неподвижную декартовую систему координат  $OXYZ$  с осью  $OZ$ , совпадающей с осью симметрии профиля заготовки, осью  $OY$ , лежащей в плоскости пересечения осей инструмента и заготовки и центром  $O$ , совпадающим с точкой пересечения осей заготовки.

При расположении брусков в плоскости пересечения осей вращения инструмента и заготовки они контактируют с обрабатываемой поверхностью своими кромками. По мере поворота головки вокруг своей оси точка контакта рабочей поверхности бруска и обрабатываемой поверхности смещается к плоскостям их симметрии. При повороте головки на  $90^\circ$  от первоначального положения точка контакта бруска и заготовки будет лежать в плоскости симметрии брусков, совпадающей с плоскостью симметрии профиля заготовки.

Введем еще две декартовые системы координат: подвижную  $OX''Y''Z''$  и неподвижную  $OXY'Z'$ . Ось  $OY'$  неподвижной системы координат  $OXY'Z'$  совпадает с осью вращения инструмента, плоскость  $XOZ'$  совпадает с плоскостью симметрии брусков в начальном положении. В таком случае плоскость  $Z'OY'$  лежит в плоскости  $ZOY$ , ось  $OX$  у систем

координат  $OXYZ$  и  $OXY'Z'$  общая, оси  $OZ''$  и  $OY'$  расположены под углом  $\alpha$  соответственно к осям  $OZ$  и  $OY$ .

Будем полагать, что плоскость осевой симметрии бруска 3 (рис.1.1) в исходном положении совпадает с осью осевой симметрии заготовки 2 и находится в плоскости  $Z'OY$ .

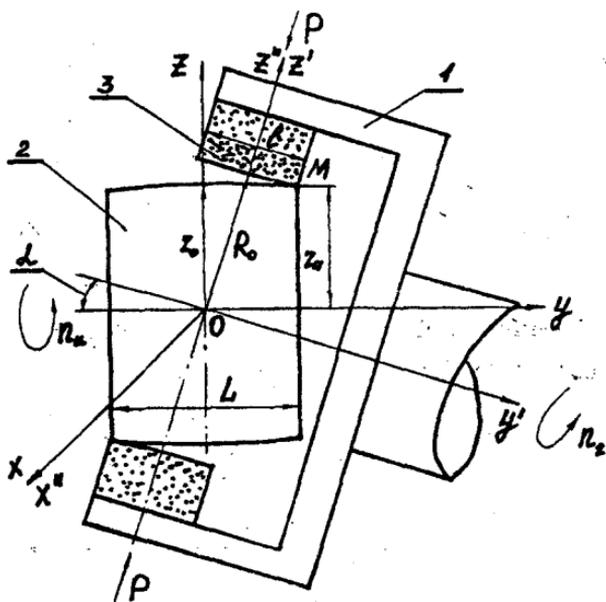


Рис.1.1. Схема брусковой обработки вращающимся инструментом

При повороте бруска в процессе обработки вокруг оси  $OY'$  на угол  $\beta$  его положение меняется относительно неподвижной системы координат  $OXY'Z'$  и остается неизменным относительно подвижной системы координат  $OX''Y''Z''$ . Следовательно, у подвижной системы координат  $OX''Y''Z''$  и неподвижной  $OXY'Z'$  ось  $OY'$  общая, а угол пересечения осей  $OZ''$  и  $OZ'$ ,  $OX$  и  $OX''$  равен углу поворота брусков  $\beta$ .

Пусть точка контакта бруска и обрабатываемой поверхности находится в точке  $M$  (см. рис. 1.1). Предположим также, что поверхность заготовки 2 описывается уравнением:

$$r_y^2 = (r_0 - Ay^n)^2, \quad (1.1)$$

где  $r_y^2 = x^2 + z^2$ ,

$A$  и  $n$  — соответственно коэффициент и показатель формы профиля заготовки;

$r_0$  — радиус заготовки в плоскости симметрии профиля;

$x, y, z$  — координаты точек поверхности заготовки в системе координат  $OXYZ$ ;

$r_y$  — радиус заготовки на расстоянии  $y$  от плоскости симметрии профиля.

При  $A=0$  поверхность заготовки является цилиндрической, при  $A \neq 0, n=2$  — параболоидом вращения. Примем далее  $n=2$ .

Запишем уравнение (1.1) в системе координат  $OXY'Z'$  и  $OX''Y''Z''$ .

Общее выражение перехода от старых координат к новым имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} x &= x \cos(\alpha x') + y \cos(\alpha y') + z \cos(\alpha z'); \\ y' &= x \cos(\alpha xy') + y \cos(\alpha yy') + z \cos(\alpha zy'); \\ z' &= x \cos(\alpha xz') + y \cos(\alpha yz') + z \cos(\alpha zz') \end{aligned} \quad (1.2)$$

и от новых к старым:

$$\begin{aligned} x &= x \cos(\alpha xx') + y' \cos(\alpha yx') + z' \cos(\alpha zx'); \\ y &= x' \cos(\alpha yx') + y' \cos(\alpha yy') + z' \cos(\alpha yz'); \\ z &= x' \cos(\alpha xz') + y' \cos(\alpha zy') + z' \cos(\alpha zz'), \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\alpha x, \alpha y', \alpha z'$  и т.д. — углы между соответствующими осями координат.

Учитывая, что в принятых системах координат  $OXYZ$  и  $OXY'Z'$ , углы  $\alpha X=0, \alpha YX'=\alpha ZX'=\alpha XY'=\alpha XZ'=90^\circ, \alpha YY'=ZZ'=\alpha$  и  $\alpha ZY'=90+\alpha, \alpha YZ'=90-\alpha$ , выражение (1.3) примет вид:

$$\begin{aligned} x &= x'; \\ y &= y' \cos \alpha + z' \sin \alpha; \\ z &= z' \cos \alpha - y' \sin \alpha. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Подставляя полученные значения  $x, y, z$  из выражения (1.4) в выражение (1.1), получим:

$$x'^2 + (z' \cos 2 - y' \sin \alpha)^2 = [r_0 - A(y' \cos \alpha + z' \sin \alpha)]^2. \quad (1.5)$$

Используя тот же принцип и принимая за новые координаты  $OX''Y''Z''$ , а за старые  $OXY'Z'$ , учитывая, что  $xx''=z'z''=\beta$ ,  $xy'=y'x''=y'z''=z'y'=90^\circ$ ,  $yy=0$ ,  $x''=90-\beta$ ;  $z'x''=90+\beta$ , получим выражение:

$$\begin{aligned} x &= x'' \cos \beta + z'' \sin \beta; \\ y &= y'; \\ z &= z'' \cos \beta - x'' \sin \beta. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Используя выражения (1.4) и (1.5), уравнения перехода от системы координат  $OXYZ$  к системе координат  $OX''Y''Z''$  запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} x &= x'' \cos \beta + z'' \sin \beta; \\ y &= y' \cos \alpha + z'' \cos \beta \sin \alpha - x'' \sin \beta \sin \alpha; \\ z &= z'' \cos \beta \cos \alpha - x'' \sin \beta \cos \alpha - y' \sin \alpha. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Подставляя значение координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  из равенств (1.7) в выражение (1.1), найдем:

$$\begin{aligned} (x'' \cos \beta + z'' \sin \beta)^2 + (z'' \cos \beta \cos \alpha - x'' \sin \beta \cos \alpha - y' \sin \alpha)^2 = \\ = [r_0 - A(y' \cos \alpha + z'' \cos \beta \sin \alpha - x'' \sin \beta \sin \alpha)]^2. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Предположим, что форма профиля осевого сечения бруска описывается выражением:

$$z'' = R_0 \pm 3 \pm B y^2, \quad (1.9)$$

где  $R_0$  — радиус вращения бруска в плоскости его симметрии, в исходном положении ( $\beta=0$ );

$3$  — величина возможного расстояния между поверхностями бруска и заготовки при повороте бруска на угол  $\beta$ ;

$B$  — коэффициент формы профиля бруска.

Из рис. 1.1

$$R_0 = r_n \cos \alpha \pm B \frac{l^2}{4} \pm \frac{L}{2} \sin \alpha, \quad (1.10)$$

где  $L$  — длина заготовки;

$l$  — длина бруска (вдоль оси вращения инструмента);

$r_n$  — периферийный радиус заготовки.

Из выражения (1.1)

$$r_n = r_0 - A \frac{L^2}{4}. \quad (1.11)$$

Зависимость  $R_0$  от влияющих факторов можно также представить в виде:

$$R_0 = \pm \frac{l}{2} \operatorname{tg} \alpha \pm \frac{r_n}{\cos \alpha} \pm B \frac{l^2}{4}. \quad (1.12)$$

Приравнивая правые части выражений (1.10) и (1.12), выразим зависимость потребной длины бруска от длины заготовки и угла скрещивания осей:

$$l = \frac{2r_n}{\sin \alpha} (\cos^2 \alpha \mp 1) \pm L \cos \alpha. \quad (1.13)$$

В выражениях (1.9), (1.10), (1.12) и (1.13) верхние знаки соответствуют наружной, а нижние — внутренней обработке.

В точке контакта  $M$  бруска и заготовки первые производные от уравнений профилей бруска и заготовки в сечении  $Z''OY'$  равны.

Первая производная от выражения (1.9) по  $dy'$  равна:

$$(z'')' = \pm 2By'. \quad (1.14)$$

Приравнивая в выражении (1.8)  $x''=0$ , найдем уравнение профиля сечения поверхности заготовки плоскостью  $Z''OY'$ :

$$(z'')^2 \sin^2 \beta + (z'' \cos \beta \cos \alpha - y' \sin \alpha)^2 = r_y^2. \quad (1.15)$$

Решим уравнение (1.15) относительно  $z''$ :

$$(z'')^2 \sin^2 \beta + (z'')^2 \cos^2 \beta \cos^2 \alpha - 2z''y' \cos \beta \cos \alpha \cos 2 \sin 2 + (y')^2 \sin^2 \alpha - r_y^2 = 0,$$

откуда

$$z'' = \frac{y' \cos \beta \cos \alpha \sin \alpha + \sqrt{r_y^2 (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha) - y'^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}}{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha}. \quad (1.16)$$

Разложим выражение под корнем равенства (1.16) в степенной ряд:

$$z'' = \frac{y' \cos \beta \cos \alpha \sin \alpha}{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha} + \frac{r_y}{\sqrt{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha}} \times \left( 1 - \frac{y'^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{2r^2 y (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)} + \frac{3y'^4 \sin^4 \alpha \sin^4 \beta}{r^4 y (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)^2} - \dots \right).$$

При условии:

$$\frac{y'^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{r_y^2 (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)} < 0.3 \quad (1.17)$$

с погрешностью до 1%

$$z'' = \frac{y' \cos \beta \cos \alpha \sin \alpha}{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha} + \frac{r_y}{\sqrt{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha}} \times \left( 1 - \frac{y'^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{2r^2 y (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)} \right). \quad (1.18)$$

Приравнивая правые части выражений (1.9) и (1.18), получим:

$$3 = \pm R_0 + By'^2 \mp \frac{y' \cos \beta \cos \alpha \sin \alpha}{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha} \mp \frac{r_y}{\sqrt{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha}} \left( 1 - \frac{y'^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{2r^2 y (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)} \right). \quad (1.19)$$

Точка контакта рабочей поверхности бруска и заготовки находится в области минимального зазора между ними. Найдя производную от выражения (1.19) и приравняв ее правую часть нулю, найдем абсциссу  $y'$  точки контакта

$$3' = 2By' \mp \frac{\cos \beta \cos \alpha \sin \alpha}{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha} \pm \frac{y' \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{r_y (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)^{1.5}} = 0.$$

Отсюда

$$y' = \pm r_y \frac{\cos \beta \cos \alpha \sin \alpha \sqrt{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha}}{2Br_y (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)^{1.5} \pm \sin^2 \alpha \sin^2 \beta} \quad (1.20)$$

При  $\beta=0$   $y' = \pm \frac{l}{2}$ , тогда

$$\frac{l}{2} = \frac{\text{tg} \alpha}{2B}$$

или

$$B = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{I} \quad (1.21)$$

Подставив выражения (1.20) и (1.21) в равенство (1.18), найдем:

$$z'' = \pm r_y \frac{\cos^2 \beta \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha}{\sqrt{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha} \left[ 2 \operatorname{tg} \alpha \frac{r_y}{I} (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)^{1.5} \pm \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \right]} + \frac{r_y}{\sqrt{\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos^2 \alpha}} \left( 1 - \frac{\cos^2 \beta \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \sin^4 \alpha}{2 \left[ 2 \operatorname{tg} \alpha \frac{r_y}{I} (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)^{1.5} \pm \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \right]^2} \right) \quad (1.22)$$

В равенствах (1.19), (1.20) и (1.22) верхний знак следует использовать для наружной обработки, а нижний — для внутренней.

Выражения (1.20) и (1.22) определяют координаты точки контакта бруска и заготовки в плоскости  $Z''Oy'$  в зависимости от заданных значений угла пересечения их осей  $\alpha$  и радиуса заготовки  $r_y$ , а также угла поворота бруска  $\beta$ .

Используя выражения (1.12) и (1.21), найдем

$$R_o = \frac{1}{4} \operatorname{tg} \alpha + \frac{r_n}{\cos \alpha} \dots \quad (1.23)$$

или с учетом равенства (1.13)

$$R_o = \frac{1}{4} L \sin \alpha + \frac{1}{2} r_n \frac{(1 + \cos^2 \alpha)}{\cos \alpha} \quad (1.24)$$

## 1.2. Формообразование профиля обрабатываемой поверхности

За счет неодинаковой скорости перемещения брусков и различной силы их взаимодействия с отдельными участками обрабатываемой поверхности сьем металла вдоль обрабатываемого профиля заготовки будет различным, в результате чего обеспечивается возможность формирования с помощью данного способа заданного профиля обрабатываемой поверхности, исправления геометрических погрешностей заготовки.

Для определения съема металла в любом произвольном поперечном сечении заготовки воспользуемся расчетной схемой, изображенной на рис.2.5 (ч.2).

Элементарный объем металла, удаляемый единичным абразивным зерном с поверхности заготовки, определяется выражением (2.49)-ч.2. При этом проекция длины царапины от абразивного зерна на дугу окружности обрабатываемой поверхности запишется в виде:

$$dx = \frac{V_u \pm V_{r,T}}{V_{2,0}} dy, \quad (1.25)$$

где  $V_u$  — окружная скорость заготовки;

$V_{r,T}$  — составляющая окружной скорости вращения зерна, направленная по касательной к поверхности заготовки;

$V_{r,0}$  — составляющая окружной скорости вращения зерна, направленная вдоль оси заготовки.

Знак “плюс” в выражении (1.25) используется при встречном вращении заготовки и инструмента, знак “минус” — при попутном.

Используя выражения (2.49)-ч.2, (2.50)-ч.2 и (1.25), найдем:

$$dV_3 = 2,53a^2 \sqrt{1 + \frac{(V_u \pm V_{r,T})^2}{V_{2,0}^2}} dy. \quad (1.26)$$

Используя выражения (2.53) (2.56)-ч.2, определим функцию:

$$\psi(dV_3) = a_m = \sqrt{\frac{dV_3}{2,53dy} \cdot \frac{V_{2,0}}{\sqrt{V_{2,0}^2 + (V_u \pm V_{r,T})^2}}}. \quad (1.27)$$

Тогда

$$\psi'(dV_3) = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_{2,0}}{2,53dy \sqrt{V_{2,0}^2 + (V_u \pm V_{r,T})^2}} \cdot dV_3}. \quad (1.28)$$

Коэффициент  $C_k$  в выражении (2.58)-ч.2 примет следующий вид:

$$C_k = \frac{V_{r,0}}{\sqrt{V_{r,0}^2 + V_u \pm V_{r,T}} 2,53dy}. \quad (1.29)$$

В параграфе 2.2 (ч.2.) получено выражение для математического ожидания объема металла, срезаемого одним абразивным зерном при его перемещении через т.М на величину  $dy$  вдоль оси заготовки:

$$dV_{3.M} = \frac{2a_m^2}{c_k (K+1)(K+2)} \quad (1.30)$$

Подставляя выражение (1.29) в равенство (1.30), получим:

$$dV_{3.H.} = \frac{5,06}{(K+1)(K+2)} a_m^2 \sqrt{1 + \frac{(V_u \pm (V_{r,T}))^2}{V}} dy \quad (1.31)$$

Площадь обрабатываемой поверхности  $dS_{об}$ , подвергшейся воздействию со стороны бруска за время контакта с т. М, будет равна:

$$S_{об} = 2\pi r_y dy \quad (1.32)$$

Тогда величина слоя металла  $t_M$ , снимаемого в точке М за один контакт с абразивным бруском, равна:

$$t_M = \frac{B_k 0,5Z_0}{H_0^K 2\pi r_y dy} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} dV_{3.M} a_M^K d\lambda \quad (1.33)$$

При многобрусковой обработке вращающимися брусками каждый брусок контактирует с каждым сечением заготовки за один оборот инструментальной головки дважды, поэтому съем металла в любом сечении за произвольное время  $\tau$  будет равен:

$$t = 2t_M Z_6 n_2 \tau, \quad (1.34)$$

где  $n_2$  — частота вращения инструмента.

Раскрывая значение  $t_M$  (2.40)-ч.2 и  $dV_{3.M}$  (2.37)-ч.2, получим:

$$t = \frac{2,53}{\pi(K+1)(K+2)} \frac{B_k Z_0 Z_6 n_2 \tau}{H_0^K r_y} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} a_M^{K+2} \sqrt{1 + \frac{(V_u \pm V_{rT})^2}{V_{\tau 0}^2}} d\lambda \quad (1.35)$$

Равенства (1.35), (2.70)-ч.2 и (2.77)-ч.2 позволяют получить выражение для расчета снимаемого припуска:

$$t = \frac{2,53}{\pi(K+1)(K+2)} \frac{B_K Z_0 z_0 n_r \tau}{H_0^K r_y} a_{\max}^{K+2} \times \quad (1.36)$$

$$\times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left[ 1 - \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2r_0 - a_{\max}} \left( 1 + \frac{r_6}{r_u} \right) \right]^{K+2} \sqrt{1 + \frac{(V_a \pm V_{r.T})^2}{V_{r.0}^2}} d\lambda .$$

Раскрывая значения  $a_{\max}$ ,  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$ , а также используя обозначения (2.73)-ч.2, получим:

$$t = \frac{0,3\Gamma(K+3,5)(K+1)\xi j n_r \tau P'}{\sqrt{2}\pi^{1,5}(K+2)\Gamma(K+3)(1+\xi)^3 r_y \tau_{\text{сдв}} K_3 \cos \alpha_m} \times \quad (1.37)$$

$$\times \int_0^1 u^{-0,5} (1-u)^{K+2} \sqrt{1 + \frac{(V_u \pm V_{r.T})^2}{V_{r.0}^2}} du .$$

Угол контакта бруска  $\alpha_m$  с обрабатываемой поверхностью зависит от угла  $\beta$  поворота бруска относительно исходного положения. Тангенс этого угла равен производной функции  $Z''$  от  $y'$  (1.18) и определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \alpha_m = (Z'')' = \frac{\cos \beta \cos \alpha \sin \alpha}{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha} - \frac{y' \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{r_y (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \cos^2 \alpha)^{1,5}} . \quad (1.38)$$

На основе выражения (1.38) можно найти:

$$\lambda = y' \cos \alpha_m + Z'' \sin \alpha_m = \frac{y'}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_m}} + Z'' \frac{\operatorname{tg} \alpha_m}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_m}} , \quad (1.39)$$

где  $y'$  и  $Z''$  определяются равенствами (1.18) и (1.20).

Так как из выражения (1.7)

$$y = y' \cos \alpha , \quad (1.40)$$

то значение  $\lambda$  можно выразить через  $y$  и найти значение  $t$  в зависимости от  $y$ . Однако в выражении (1.36) окружная  $V_{r.0}$  и тангенциальная  $V_{r.T}$  составляющие скорости вращения инструментальной головки зависят от угла ее поворота  $\beta$ . Несложно определить:

$$V_{r.T} = V_2 \sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \cos^2 \alpha} , \quad (1.41)$$

$$V_{r,0} = V_2 \sin \alpha \sin \beta .$$

В свою очередь:

$$V_2 = 2\pi Z'' n_2 . \quad (1.42)$$

Выразив из уравнения (1.38) величину  $\beta$  через  $\lambda$ , подставив найденные значения в выражение (1.40), а затем в (1.36), можно определить сьем металла вдоль профиля заготовки.

Выражение (1.37) сложно в вычислении. Решим его методом линеаризации. Тогда на основе соответствующих преобразований получим:

$$t = \frac{0.3(K+1)\xi z_0 n_r \tau P N_1}{\sqrt{2\pi(K+2)(1+\xi)^3 r_y \tau_{сдв} K_3 \cos \alpha_m}} \sqrt{1 + \frac{(V_u \pm V_{r,Т.М.})^2}{V_{r,0.M}^2}} , \quad (1.43)$$

где  $N_1$  — коэффициент, учитывающий погрешность преобразования выражения (1.37) на основе метода линеаризации ( $N_1=100$ );

$V_{r,0.M}$ ,  $V_{r,Т.М.}$  — соответственно средняя тангенциальная и средняя осевая составляющие скорости перемещения бруска через поперечное сечение заготовки, проходящее через т.М.

После некоторых преобразований выражение (2.53)-ч.2 примет следующий вид:

$$t = \frac{0,07(K+1)\xi z_0 n_r \tau P N_1}{(K+2)(1+\xi)^3 \tau_{сдв} r_y K_3 \cos \alpha_m} \sqrt{1 + \frac{(V_u \pm V_{Т.Т.М.})^2}{V_{r,0.H}^2}} . \quad (1.44)$$

Равенство (1.44) позволяет определить уравнение профиля изделия после обработки:

$$\Delta Z_y = Z_0 - Z_y = t_0 \left( \frac{t_y}{t_0} - 1 \right) , \quad (1.45)$$

где  $Z_0$  и  $Z_y$  — ординаты точек профиля изделия соответственно в плоскости симметрии и на расстоянии  $y$  от нее;

$t_0$  и  $t_y$  — сьем металла соответственно в центре профиля и на расстоянии  $y$  от него вдоль оси изделия.

Так как в центре профиля  $Z'' = 0$ , а  $\cos \alpha_m = 1$ , то

$$t_0 = \frac{0,07(K+1)\xi z_6 n_r \tau P N_1}{(K+2)(1+\xi)^3 \tau_{с/ш} r_0 K_3} \sqrt{1 + \frac{(V_u \pm V_{r.T.0})^2}{V_{r.0.0}}} \quad (1.46)$$

Взяв отношение выражений (1.44) и (1.46), получим:

$$\Delta Z_y = t_0 \left( \frac{Z''}{r_y \cos \alpha_M} \sqrt{\frac{V_{r.0.0}^2}{V_{r.0.0}^2 + (V_u \pm V_{r.T.0})^2}} \sqrt{\frac{V_{r.0.M}^2 + (V_u \pm V_{r.T.M})^2}{V_{r.0.M}^2}} - 1 \right) \quad (1.47)$$

Найдем значения  $V_{r.T}$  и  $V_{r.0}$ :

$$V_{r.T} = \frac{2\pi n_2}{\beta_k - \beta_H} \int_{\beta_H}^{\beta_k} Z'' \sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \cos^2 \alpha} d\beta, \quad (1.48)$$

$$V_{r.0} = \frac{2\pi n_2 \sin \alpha}{\beta_k - \beta_H} \int_{\beta_H}^{\beta_k} Z'' \sin \beta d\beta,$$

где  $\beta_H$  и  $\beta_k$  — угол поворота середины бруска из начального положения соответственно до начала его контакта с заданным поперечным сечением заготовки и до конца контакта бруска с этим сечением.

Из выражения (1.22), с учетом (1.13) максимальное и минимальное значения  $Z''$  при  $\beta = 0$  и  $\beta = \frac{\pi}{2}$  будут иметь следующий вид:

$$Z''_{\max} = \pm \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha + \frac{r_H}{\cos \alpha} = r_H \cos \alpha \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{L}{r_H} \operatorname{tg} \alpha \right),$$

$$Z''_{\min} = r_0.$$

Тогда

$$\frac{Z''_{\max}}{Z''_{\min}} = \frac{r_H}{r_0} \cos \alpha \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{L}{r_H} \operatorname{tg} \alpha \right) \quad (1.49)$$

При  $\frac{r_a}{r_0} \leq 0,99$ ,  $\frac{L}{r_H} \leq 2$  и  $\alpha \leq 40^\circ$  величину  $Z''$  можно принять

постоянной в пределах контакта бруска с заданным поперечным сечением изделия, и выражения (1.48) примут вид:

$$V_{r,T} = \frac{2\pi n_2 Z''}{\beta_K - \beta_H} N_2 \int_{\beta_H}^{\beta_K} \sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \cos^2 \alpha} d\beta, \quad (1.50)$$

$$V_{r,0} = \frac{2\pi n_2 Z'' \sin \alpha}{\beta_K - \beta_H} N_2 \int_{\beta_H}^{\beta_K} \sin \beta d\beta,$$

где  $N_2$  — коэффициент, учитывающий погрешность расчета выражений (1.48) при  $Z'' = const$ .

Так как нас интересует абсолютное значение скоростей  $V_{r,T}$  и  $V_{r,0}$ , то, чтобы избежать ошибки расчетов при нахождении значений интегралов, в выражениях (1.50) следует брать модуль подынтегрального выражения. При этом выражения (1.50) примут следующий вид:

$$V_{r,T} = \frac{2\pi n_2 Z''}{\beta_K - \beta_H} N_2 [E(\sin \alpha; \beta_K) - E(\sin \alpha; \beta_H)], \quad (1.51)$$

$$V_{r,0} = \frac{2\pi n_2 Z'' \sin \alpha}{\beta_K - \beta_H} N_2 (\cos \beta_0 - \cos \beta_K), \quad (1.52)$$

где  $E(\alpha, \beta)$  — эллиптический интеграл второго рода в лежандровой форме;

$$\beta_0 = \frac{\beta_K + \beta_H}{2}. \quad (1.53)$$

Очевидно:

$$\beta_K - \beta_H = \frac{B_6}{Z''} \quad \text{или} \quad \beta_K - \beta_0 = \beta_0 - \beta_H = \frac{1}{2} \frac{B_6}{Z''}. \quad (1.54)$$

Тогда в центре профиля заготовки ( $\beta_0 = \frac{\pi}{2}$ )

$$V_{r,T,0} = \frac{4\pi n_2 r_u^2}{B_6} N_{20} \left[ K(\sin \alpha) - E\left(\sin \alpha; \frac{\pi}{2} - \frac{B_6}{2r_u}\right) \right], \quad (1.55)$$

$$V_{r,0} = \frac{4\pi n_2 r_u^2}{B_6} N_{20} \sin \alpha \sin \frac{B_6}{r_u},$$

где  $N_{20}$  — значение коэффициента  $N_2$  в центре профиля.

Подставляя выражения (1.51), (1.52) и (1.55) в равенство (1.47), получим:

$$\Delta Z_y = t_0 \left( \frac{r_u^3 \sin \frac{B_6}{2r_u}}{Z'' \cos \alpha_m \cos \beta_0 - \cos \beta_{11}} N - 1 \right), \quad (1.56)$$

$$\text{где } N = \frac{N_{20}}{N_2} \sqrt{\frac{V_{r.0.M}^2 + (V_u \pm V_{r.T.M})^2}{V_{r.0.0}^2 + (V_u \pm V_{r.T.0})^2}}. \quad (1.57)$$

При  $y_m = \frac{L}{2} (\beta = 0)$  можно определить величину выпуклости обработанной поверхности:

$$\Delta \delta = t_0 \left[ \left( \sin \frac{B_6}{2r_u} N \right) / \left( \cos^4 \alpha \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{L}{r_u} \operatorname{tg} \alpha \right)^3 \left( 1 - \cos \frac{B_v}{2r_u \cos \alpha \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{L}{r_u} \operatorname{tg} \alpha \right)} \right) \right) - 1 \right]. \quad (1.58)$$

С погрешностью до 3% при  $\alpha \leq 30^\circ$ ;  $\frac{L}{r_u} \leq 1$  и  $\frac{B_6}{r_u} \leq 1$  найдем

$$\delta = t_0 \left( \frac{2r_u N_{об}}{B_6 \cos \alpha} - 1 \right), \quad (1.59)$$

$$\text{где } N_{об} = N_0 \frac{\sin \frac{B_6}{2r_u} \frac{B_6^2}{4r_u^2 \cos^2 \alpha \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{L}{r_u} \operatorname{tg} \alpha \right)^2}}{\left( 1 - \cos \frac{B_6}{2r_u \cos \alpha \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{L}{r_u} \operatorname{tg} \alpha \right)} \right) \frac{B_6}{r_u}},$$

$$N_0 = 0,22.$$

Таким образом, используя выражения (1.46) и (1.55), можно определить величину припуска, снимаемого инструментом в центре обрабатываемого профиля, а выражение (1.59) позволяет вычислить величину выпуклости обрабатываемой поверхности.

### 1.3. Влияние технологических факторов профилирующей доводки на выходные параметры обработки

Выполненные исследования показывают, что в процессе профилирующей брусковой доводки возможно рациональное формирование обрабатываемого профиля в широком диапазоне геометрических параметров. Изменяя режимы обработки, можно получать различные по геометрической форме профили, очерченные кривыми переменного радиуса, что очень важно при формообразовании рабочих поверхностей деталей, работающих в условиях контактного нагружения. Так, в работах [49-56], а также в данной работе (глава 2) показано, что, придавая профилю дорожки качения подшипника форму степенной кривой 5-й — 6-й степени, можно увеличить долговечность и надежность подшипника от двух до четырех раз.

На рис. 1.2 — 1.4 представлены результаты расчетов съема припуска и величины выпуклости дорожки качения внутреннего кольца роликоподшипника 2212 при обработке исследуемым методом с различными режимами. Все зависимости получены для случая обработки четырьмя абразивными брусками с характеристикой 63 CM10CM1KJ при следующих условиях:  $K = 3$ ,  $\xi = 1,34$ ,  $\tau = 0,1$  мин,  $P_6 = 7$  кг,  $K_3 = 1$ ,  $B_6 = 10$  мм,  $\alpha = 3^\circ$ ,  $r_{сдв} = 134$  кг/мм<sup>2</sup>,  $Z_6 = 4$ .

На рис. 1.2 показано влияние частоты вращения изделия  $n_u$  на интенсивность снимаемого припуска в центре обрабатываемого профиля  $t_0$  и на величину его выпуклости  $\delta$ . Как видно, с увеличением частоты вращения изделия производительность съема припуска увеличивается, при этом возрастает и величина выпуклости обрабатываемого профиля. Сравнивая теоретические зависимости с данными эксперимента, следует отметить, что относительная погрешность расчета не превышает 20%.

Значения параметров выпуклости профиля и съема припуска, рассчитанные по теоретическим формулам во всем диапазоне варьирования частоты вращения изделия, несколько занижены

по сравнению с экспериментальными данными. Это связано с тем, что в теоретических расчетах были использованы некоторые упрощения, связанные с определением составляющих окружных скоростей изделия и инструментальной головки.

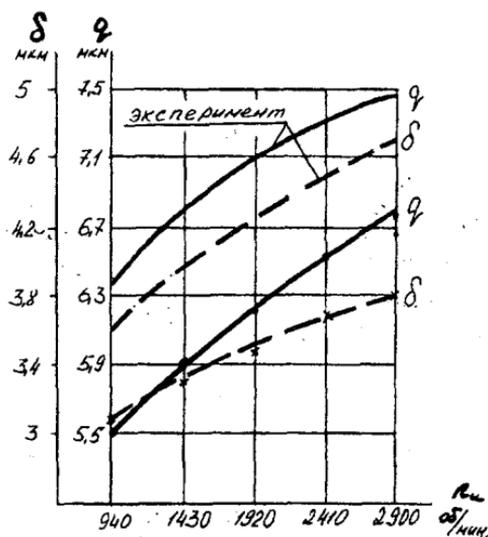


Рис. 1.2. Зависимость производительности съема припуска  $q$  и величины выпуклости  $\delta$  роликовой дорожки от частоты вращения изделия  $n$ .

Более значительное влияние на параметры обработки оказывает частота вращения инструментальной головки  $n_1$  (рис. 1.3). С ее увеличением производительность съема припуска и интенсивность формообразования резко возрастают. Однако наибольшее влияние на анализируемые показатели обработки оказывает величина давления  $P_6$  абразивных брусков на обрабатываемую поверхность (рис. 1.4).

Увеличение давления брусков в 4 раза приводит к увеличению производительности обработки почти в 6 раз, а интенсивность формообразования возрастает в 5,5 раза.

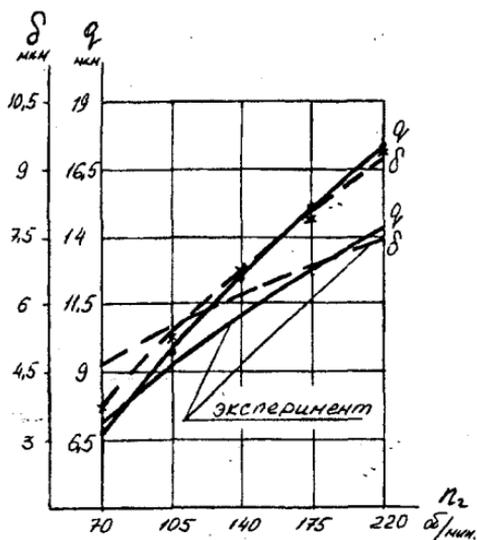


Рис. 1.3. Зависимость производительности съема припуска  $q$  и величины выуклости  $\delta$  роликовой дорожки от частоты вращения инструментальной головки  $n_2$

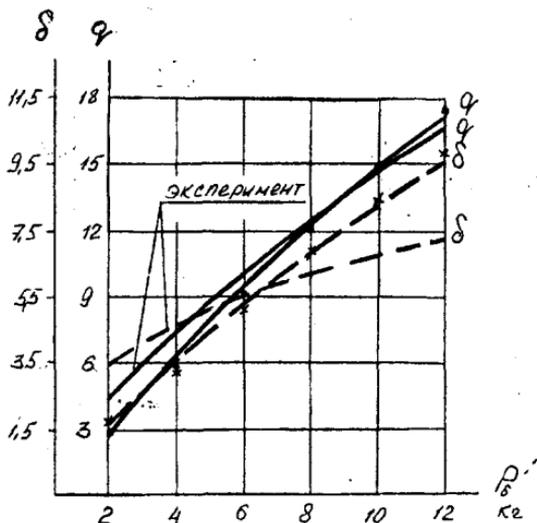


Рис. 1.4. Зависимость производительности съема припуска  $q$  и величины выуклости  $\delta$  роликовой дорожки от давления брусьев  $P_6$

Наибольшее расхождение теоретических и экспериментальных данных, как видно из рис. 1.3 и 1.4, наблюдается в начале и в конце диапазона изменения режимов обработки, в конце этого диапазона расхождения наиболее велики. Однако в области средних значений факторов, т.е. тех значений, которые используются на практике, наблюдается хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных, которые в некоторых случаях даже совпадают.

Имеющаяся погрешность расчета исследуемых параметров обработки обусловлена невозможностью учета в теоретических исследованиях некоторых кинематических и динамических особенностей, присущих конкретному технологическому оборудованию. Неточность обработки деталей и сборки отдельных узлов станков приводит к возникновению дополнительных инерционных нагрузок, вибраций и т.д., которые оказывают сильное влияние на результаты обработки, особенно в тех случаях, когда речь идет о прецизионных методах формообразования поверхностей. В целом же, полученные выражения обеспечивают погрешность расчета в пределах 20%, что вполне приемлемо для инженерных расчетов.

#### **1.4. Технологическое оборудование и условия проведения экспериментальных исследований**

Цикл экспериментальных исследований состоял из следующих этапов:

1. Определили влияние угла пересечения осей вращения заготовки и инструментальной головки ( $\alpha$ ), частоты вращения брусков ( $n_2$ ), давления брусков на обрабатываемую поверхность ( $P_6$ ) и частоты вращения изделия ( $n_0$ ) на величину съема металла ( $q$ ), величину выпуклости профиля ( $\delta$ ), шероховатость ( $R_a$ ), волнистость  $W_z$  и отклонение от круглости  $\Delta_{кр}$  обработанной поверхности.

2. Исследовали влияние на величину съема металла  $q$ , величину выпуклости профиля  $\delta$ , шероховатость  $R_a$ , отклонение от круглости  $\Delta_{кр}$  и волнистость  $W_z$  времени обработки, твердости и зернистости брусков.

В качестве объекта исследований использовали внутренние кольца радиального роликового подшипника № 42212 6 класса точности ГОСТ 520-71 (рис. 1.5), которые были изготовлены из стали ШХ-15 ГОСТ-801-78 и термически обработаны до твердости HRC<sub>2</sub> 61...65.

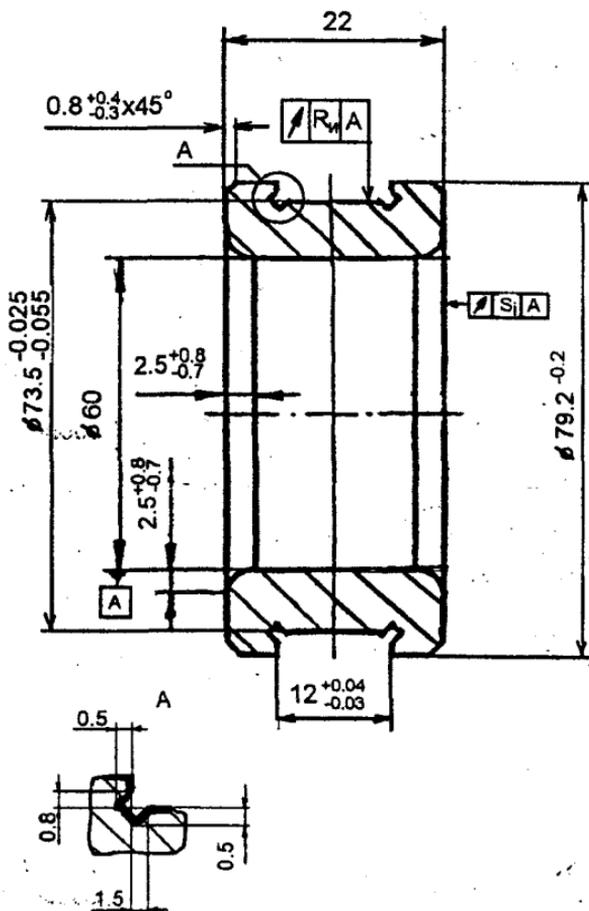


Рис. 1.5. Внутреннее кольцо роликоподшипника 2212

Кольца были обработаны окончательно по всем поверхностям, кроме роликовых дорожек. Роликовые дорожки подвергались предварительному и окончательному шлифованию и имели следующие показатели: шероховатость -  $R_a=0,6-0,32$  мкм., волнистость  $W_z=0,5 - 1,2$  мкм., отклонение от круглости  $\Delta_{кр}=1,2 - 3,2$  мкм.

В процессе экспериментальных исследований использовали литые абразивные бруски из карбида кремния зеленого на керамической связке.

Обработку производили одновременно четырьмя абразивными брусками, имеющими одинаковые размеры и характеристику и расположенными на обрабатываемой поверхности с равным угловым шагом (рис.1.6). Техническая характеристика автомата МД-2500, на котором производились эксперименты, представлена в табл. I.I.

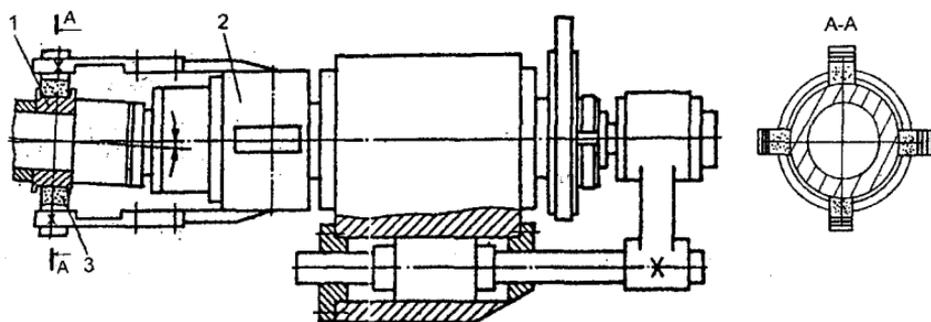


Рис.1.6. Схема четырехбрусковой инструментальной головки

Таблица I.I

### Техническая характеристика автомата МДА - 2500

Диапазон размеров обрабатываемых колец, мм:

диаметр отверстия внутренних колец .....	50÷100
высота колец .....	15÷50
Количество позиций обработки, шт .....	I
Производительность, шт/час .....	250÷300
Частота вращения шпинделя изделия, об/мин .....	800÷3000
Частота вращения инструмента, об/мин .....	70÷220

Угол скрещивания осей шпинделей изделия и инструментальной головки, градусы .....	1÷14
Усилие прижима инструмента к обрабатываемой поверхности, кгс .....	2÷15
Характеристика абразивного бруска .....	M14(M3÷CM1)
	КЛ, пропитанные серой
Характеристика СОЖ, % :	
масло индустриальное Н-5А ГОСТ 20799-75 .....	96÷98
олеиновая кислота марки "Б" .....	2÷4
Количество СОЖ, заливаемой в бак, л .....	200
Количество масла, заливаемого в бак гидростанции, л .....	95
Рабочая жидкость гидросистемы .....	масло индустриальное Н-5А
Емкость бака насосной станции, л .....	200
Суммарная установленная мощность электродвигателей, кВт .....	6,6
Уровень шума, дБ .....	не более 85
Габаритные размеры автомата, мм .....	1750x900x830
Масса, кг .....	3500
Способ базирования заготовок .....	гидростатическое центрирование с поджимом по торцу самоустанавливающимся упором
Способ очистки СОЖ .....	центробежный
Класс точности станка по ГОСТ 8-71 .....	6

Автомат имеет одну позицию обработки, а также позиции загрузки и выгрузки. Обработку осуществляют вращающимися абразивными брусками, ось вращения которых в горизонтальной плоскости развернута относительно оси вращения шпинделя изделия на  $1^{\circ}$ - $14^{\circ}$ , а точка пересечения их осей находится в плоскости симметрии обрабатываемого профиля.

Базирование колец в радиальном направлении осуществляется на неподвижной гидростатической опоре. Для центрирования используется смазочно-охлаждающая жидкость автомата.

Привод кольца во вращение осуществляется за счет силы трения, возникающей между торцом ведущего упорного кольца, закрепленного на шпинделе изделия, и торцом обрабатываемого кольца, которое прижимается самоустанавливающимся упором. Давление центрирующей жидкости находится в пределах  $2-4 \text{ кгс/см}^2$ .

Гарантированный диаметральный зазор между базовой поверхностью отверстия обрабатываемого кольца и наружной поверхностью гидростатической опоры обеспечивается в пределах  $0,06 - 0,08 \text{ мм}$ . Очистка охлаждающей и центрирующей жидкости осуществляется центрифугой.

Автомат (рис. 1.7) состоит из станины 1, бабки изделия 3, инструментальной бабки 5, автооператора 4, электрошкафа 9, гидростанции 6, насосной станции 7, центрифуги 8, натяжного устройства 2 и электро,-гидроаппаратуры.

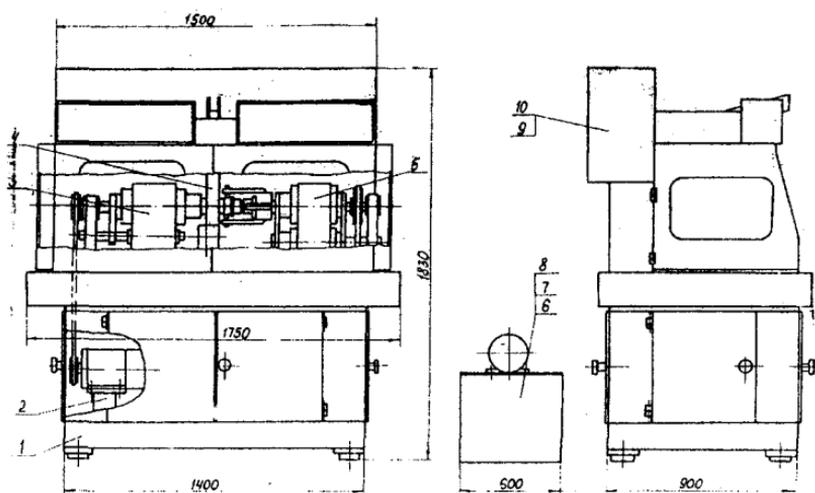


Рис. 1.7. Схема расположения основных частей многобрускового автомата МДА-2500

Бабка изделия (рис. 1.8) предназначена для вращения обрабатываемого кольца и перемещения его в зону обработки и в зону выгрузки. Она состоит из корпуса 12, выполненного в виде цилиндра, в котором на гидростатических опорах 15 размещен корпус шпинделя изделия 6, выполненный в виде поршня. В шпинделе на подшипниках смонтирован полый вал 7, внутри которого, также на подшипниках, расположен шток 8, на правой стороне которого закреплена гидростатическая опора 10. На правой стороне вала 7 закреплён упорный фланец 14, а левая сторона вала входит в зацепление при помощи шлицевого соединения со шкивом 3, смонтированным на подшипниках в корпусе 4.

Вращение вала шпинделя изделия осуществляется через клиноременную передачу от электродвигателя, установленного на нижней плите станины. Чтобы корпус шпинделя не проворачивался во время работы, к нему прикреплена крышка 5, в нижней части которой жестко закреплён шток 11, размещённый в корпусе 12. Штоки 8 и 11 между собой соединены при помощи планки 2.

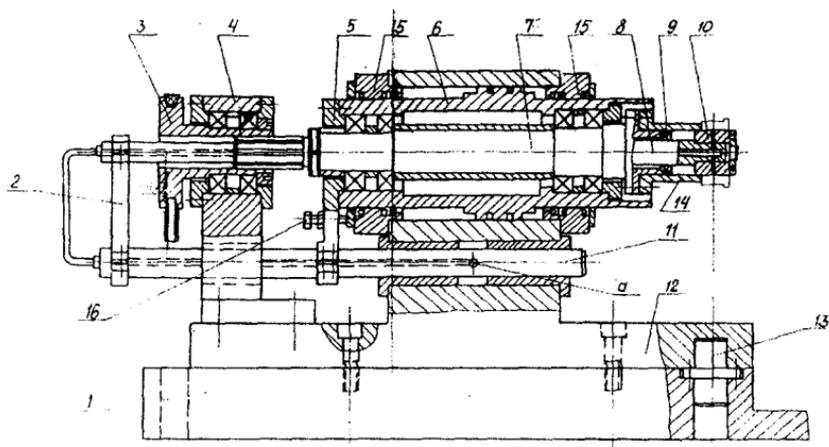


Рис. 1.8. Бабка изделия автомата МДА-2500

Для гидростатического центрирования обрабатываемого кольца масло подается под давлением от насосной станции через отверстие "А" по каналам в штоках 11 и 8 к гидроопоре 10.

На основании 1 закреплена ось 13, относительно которой поворачивается корпус 12. Совмещение оси поворота с плоскостью симметрии обрабатываемого профиля осуществляется болтом 16.

Для перемещения шпинделя изделия используется гидравлический привод. Бабка инструментальная (рис. 1.9) предназначена для вращения, прижима и разжима абразивных брусков, а также прижима торца обрабатываемого кольца к шпинделю изделия.

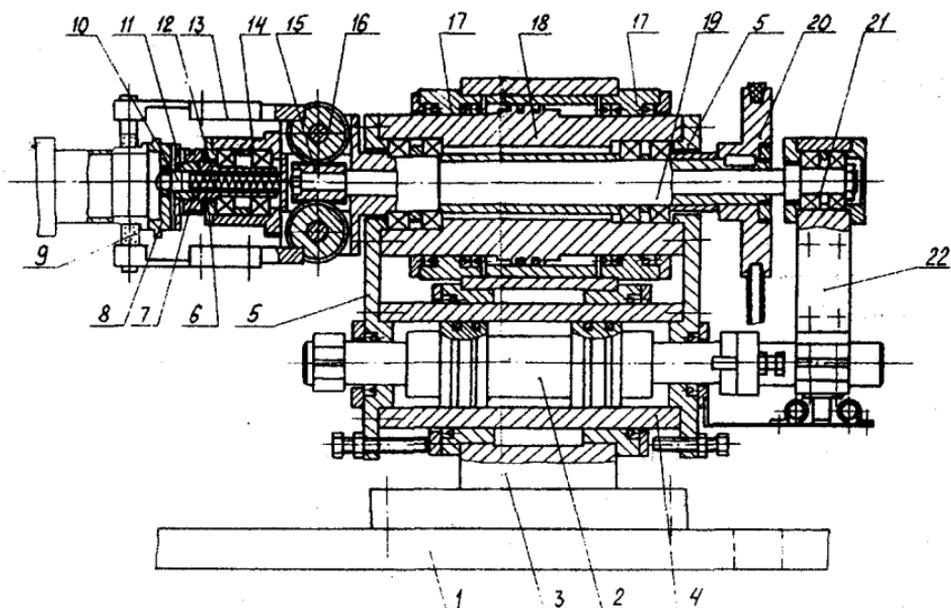


Рис. 1.9. Инструментальная головка автомата МДА-2500

Конструктивная схема автомата обеспечивает следующие главные и вспомогательные движения: вращение шпинделя изделия, подвод и отвод шпинделя изделия, загрузку и выгрузку обрабатываемых колец, вращение шпинделя инструментальной головки, разжим и сжатие абразивных

брусков, подвод и отвод шпинделя инструментальной головки (в подведенном положении осуществляется прижим по торцу обрабатываемого кольца самоустанавливающимся упором), охлаждение и промывка обрабатываемых колец, гидростатическое центрирование обрабатываемых колец.

Подвод и отвод шпинделя изделия осуществляется от гидропривода (рис.1.10). Масло из гидростанции направляется насосом 50 через фильтр 41, обратный клапан 42, редукционный клапан 29, гидрораспределитель 30 и дроссель 13 в левую полость гидроцилиндра 5, вследствие чего происходит подвод шпинделя изделия в рабочее положение. При переключении гидрораспределителя 30 масло будет поступать в правую полость цилиндра 5 и шпиндель изделия будет перемещаться в исходное (нерабочее) положение.

При поступлении масла через редукционный клапан 31, гидрораспределитель 32, дроссель 18 в нижнюю полость цилиндра 17 обработанное кольцо будет выгружаться, а при переключении гидрораспределителя 32 масло будет поступать в верхнюю полость цилиндра 17, при этом будет происходить загрузка колец.

Вращение инструментальной головки осуществляется от электродвигателя 23 через клиноременную передачу.

Разжим и сжатие абразивных брусков производится гидроцилиндром 21. Масло через редукционный клапан 33, гидрораспределитель 34 и дроссель 20 поступает в левую полость цилиндра 21, вследствие чего происходит сжатие абразивных брусков, а при переключении гидрораспределителя 34 масло будет поступать в правую полость цилиндра 21, при этом будет происходить разжим абразивных брусков.

Подвод и отвод шпинделя инструментальной бабки осуществляется цилиндром 8. Масло через редукционный клапан 35 и гидрораспределитель 36 поступает в правую полость цилиндра 8, вследствие чего происходит подвод шпинделя инструментальной бабки в рабочее положение, при котором происходит прижим обрабатываемых

колец по торцу, а при переключении гидрораспределителя 36 масло поступит в левую полость цилиндра и произойдет отвод шпинделя инструментальной бабки в нерабочее положение.

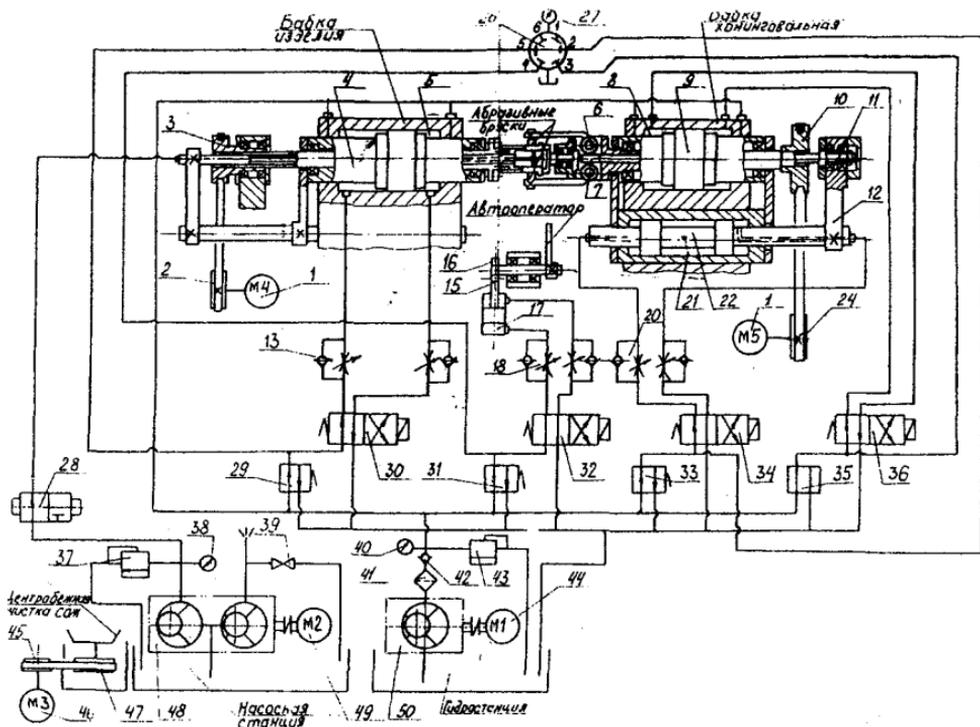


Рис. 1.10. Гидросхема автомата МДА-2500

Условия проведения экспериментальных исследований представлены в табл. 1.2., они были определены на основе анализа результатов теоретических исследований и предварительных опытов, а также возможностей технологического оборудования.

Для проведения экспериментальных исследований станок оснастили контрольно-измерительными приборами.

Контроль частоты вращения изделия и инструментальной головки осуществляли с помощью измерительных дисков, установленных на

шкивах шпинделей изделий, инструмента и индукционных датчиков, электрически связанных с цифровыми тахеометрами модели ТЦ-5.

Таблица 1.2

**Условия проведения экспериментальных исследований**

Наименование факторов процесса	Численные значения факторов	Единицы измерения
1	2	3
Абразивные бруски	БП12х1063СМ10СМ1КЛ БП12х1063СМ7М1КЛ БП12х1063СМ14М1КЛ БП12х1063СМ14СМ1КЛ	4 шт. 4 шт. 4 шт. 4 шт.
Длина бруска с державкой	25	мм
Частота вращения инструментальной головки	70 - 220	об./мин.
Давление на бруски	2-12	кг
Частота вращения изделий	940-2900	об./мин
Угол скрещивания осей вращения инструментальной головки и заготовки	2° - 14°	градус
Время обработки	3- 20	с
Твердость абразивных брусков	20 - 50	НРА
Зернистость абразивных брусков	М7:М14	мкм
Смазывающе-охлаждающая жидкость (СОЖ)	смесь из велосита (88%), керосина (10%) и олеиновой кислоты (2%)	%
Способ подачи СОЖ	поливом	
Расход СОЖ	20	л/мин

Угол скрещивания осей вращения изделия и инструмента устанавливали с помощью устройства, специально предусмотренного конструкцией станка.

Силу давления абразивных брусков на обрабатываемую поверхность контролировали динамометром модели ДП-20, который устанавливали на лоток подачи заготовок в рабочую зону с возможностью взаимодействия с одним из рычагов инструментальной головки.

Время цикла обработки устанавливали с помощью реле времени.

Действительные значения факторов и их кодовые обозначения представлены в табл. 1.3 и 1.4.

Первая фаза экспериментов проводилась с использованием абразивных брусков с характеристикой 63СМ10СМ1КЛ, а продолжительность обработки составляла 6 секунд.

Во второй фазе исследований режимы обработки имели следующие значения: частота вращения изделия - 2900 об/мин, частота вращения брусков - 120 об/мин, давление брусков на обрабатываемую поверхность - 7 кг, угол скрещивания осей вращения заготовки и инструмента - 3°.

Таблица 1.3

**Действительные значения факторов, варьируемых на первом этапе экспериментальных исследований**

Уровни	Факторы процесса в единицах измерения			
	$n_z$ , об./мин.	$n_b$ , об./мин.	$P_6$ , МПа	$\alpha$ , °
Верхний	2900	220	12	14
Нижний	940	70	2	2
Основной	1920	145	7	8
Интервал варьирования	980	75	5	6
Код. обозначения	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$

На первом этапе исследований строили планы матрицы планирования полного факторного эксперимента типа  $2^4$ , а на втором -  $2^3$ .

Обработку результатов экспериментов и построение линейной модели уравнения регрессии производили в соответствии с методикой, изложенной в главе 3 второй части, а результаты расчетов заносили в журнал планирования эксперимента (приложения 1-10).

На третьем этапе исследований после определения рациональных режимов обработки провели производственные испытания предложенного способа суперфиниширования, условия проведения которых, а также результаты, представлены в приложениях 11-13.

Таблица 1.4

**Действительные значения факторов, варьируемых на втором этапе экспериментальных исследований**

Уровни	Факторы процесса в единицах измерения		
	$T_v$ , с	HRA, ед.	$Z$ , мкм
Верхний	10	50	14
Нижний	3	20	7
Основной	11,5	35	10,5
Интервал варьирования	8,5	15	3,5
Кодовые обозначения	$x_1$	$x_2$	$x_3$

**1.5. Экспериментальные исследования влияния условий обработки на ее производительность и точностные показатели**

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости выходных параметров доводки дорожек качения колец роликоподшипников от режимов суперфиниширования:

$$\begin{aligned}
 q &= 0,114 \cdot n_4^{0,146} \cdot n_2^{0,521} \cdot P_6^{0,635} \cdot \alpha^{0,246}, \\
 \delta &= 0,037 \cdot n_4^{0,252} \cdot n_2^{0,369} \cdot P_6^{0,414} \cdot \alpha^{0,431}, \\
 R_n &= 0,07 \cdot n_4^{-0,122} \cdot n_2^{0,225} \cdot P_6^{0,189} \cdot \alpha^{0,088}, \\
 W_z &= 11,953 \cdot n_4^{-0,442} \cdot n_2^{-0,319} \cdot P_6^{0,326} \cdot \alpha^{0,118}, \\
 \Delta_{z,p} &= 491,273 \cdot n_4^{-0,571} \cdot n_2^{-0,422} \cdot P_6^{0,335} \cdot \alpha^{-0,187}.
 \end{aligned}
 \tag{1.60}$$

Данные зависимости получены при обработке одновременно четырьмя абразивными брусками с характеристикой 63СМ10СМ1КЛ в течение 6 секунд.

Из рис. 1.11, на котором представлены зависимости производительности обработки  $q$  и величины выпуклости  $\delta$  обработанного профиля от частоты вращения изделия  $n_4$  и инструментальной головки  $n_2$ , видно, что с увеличением частоты вращения изделия производительность съема припуска и величина выпуклости профиля возрастают. С увеличением частоты вращения изделия увеличивается число контактов абразивных зерен с отдельными участками обрабатываемой поверхности в единицу времени, что способствует увеличению производительности съема припуска на всей поверхности обработки. Вместе с тем, в силу кинематических особенностей исследуемого метода обработки скорость перемещения брусков по обрабатываемой поверхности носит переменный характер.

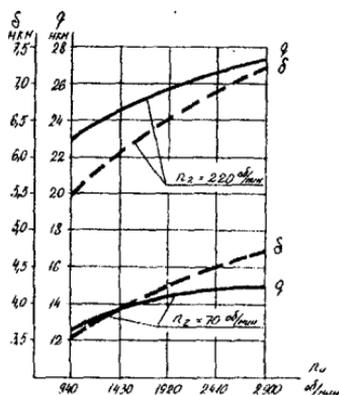


Рис. 1.11. Зависимость производительности  $q$  и величины выпуклости обработанного профиля  $\delta$  от частот вращения заготовки  $n_4$  и инструментальной головки  $n_2$  при  $P_6 = 7$  кг,  $\alpha = 3^\circ$ ,  $T = 6$  с.

По мере движения брусков от периферии обрабатываемого профиля к его центральной части их скорость увеличивается, а после прохождения плоскости симметрии заготовки уменьшается. Таким образом, в центральной части обрабатываемого профиля скорость перемещения абразивных брусков максимальна, а по краям - минимальна. Поэтому с увеличением частоты вращения изделия суммарное время контакта брусков с центральной частью обрабатываемого профиля будет увеличиваться медленнее, чем суммарное время их контакта с его периферией. В результате этого, с повышением частоты вращения изделия будет увеличиваться величина выпуклости обрабатываемого профиля, однако это увеличение, как видно из рис. 1.11, незначительно.

При увеличении частоты вращения изделия уменьшается время единичного контакта рабочих зерен с микровыступами, снижается глубина внедрения режущей части зерен в поверхность обработки и, соответственно, уменьшается высота микронеровностей обработанной поверхности (рис. 1.12).

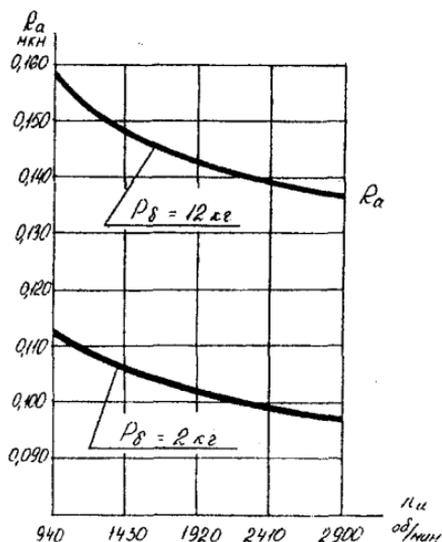


Рис. 1.12. Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от частоты вращения заготовки  $n$  и силы давления брусков  $P_\delta$  при  $n_0 = 120 \text{ об/мин}$ ,  $\alpha = 3^\circ$ ,  $T = 6 \text{ с}$ .

Увеличение силы давления брусков на обрабатываемую поверхность приводит к возрастанию удельного давления инструмента и более глубокому проникновению режущих зерен в металл, что способствует увеличению шероховатости поверхности. Как видно из рис. 1.12, с увеличением силы давления брусков с 2 кг до 12 кг шероховатость обработанной поверхности увеличивается в 1,4 раза.

Как было отмечено ранее, увеличение частоты вращения изделия приводит к повышению производительности съема припуска, при этом возрастает исправляющая способность обработки. Как видно из рис. 1.13, с увеличением частоты вращения изделия волнистость  $W_2$  и отклонение от круглости  $\Delta_{кр}$  уменьшаются. В области низких частот вращения заготовки (940 об/мин - 1920 об/мин) интенсивность уменьшения погрешностей геометрической формы в поперечном сечении изделия значительно выше, чем в области высоких значений (1920 об/мин - 2900 об/мин).

Более значительное изменение анализируемых параметров с ростом частоты вращения изделия наблюдается при работе на повышенных скоростях вращения инструментальной головки  $n_r$  (рис. 1.11 и 1.13).

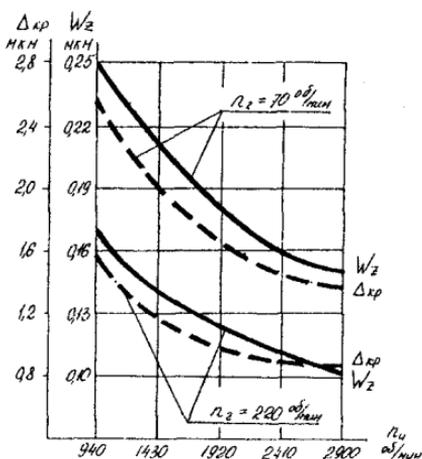


Рис. 1.13. Зависимость волнистости  $W_2$  и некруглости  $\Delta_{кр}$  обработанной поверхности от частот вращения заготовки  $n_1$  и инструментальной головки  $n_r$  при  $P_6=7$  кг,  $\alpha=3^\circ$ ,  $T=6$  с.

Возрастание частоты вращения инструментальной головки  $n_2$  способствует интенсификации процесса резания, при этом увеличивается производительность обработки  $q$  и величина выпуклости обработанного профиля  $\delta$  (рис. 1.14).

Это происходит потому, что с увеличением частоты вращения заготовки увеличивается средняя скорость перемещения брусков на всех участках обрабатываемой поверхности, абразивные зерна начинают более интенсивно взаимодействовать с микронеровностями поверхности обработки, улучшаются условия их самозатачивания, возрастает число контактов бруска с каждой точкой обрабатываемого профиля в единицу времени, увеличивается глубина внедрения зерен в поверхность заготовки, что приводит также к возрастанию исправляющей способности обработки и к увеличению высоты микронеровностей обработанной поверхности (рис. 1.15).

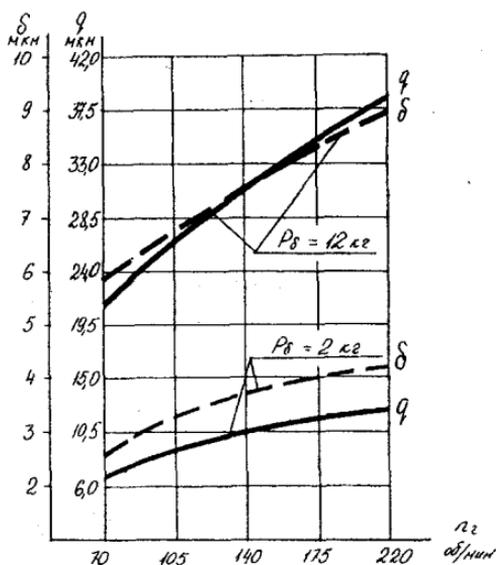


Рис. 1.14. Зависимость производительности  $q$  и величины выпуклости обработанного профиля  $\delta$  от частоты вращения инструментальной головки  $n_2$  и силы давления брусков  $P_\delta$  на обрабатываемую поверхность при  $n_n = 2900$  об/мин,  $\alpha = 3^\circ$ ,  $T = 6$  с.

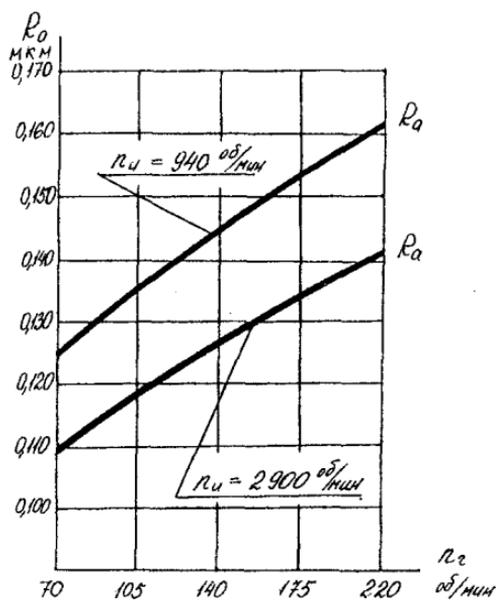


Рис. 1.15. Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от частоты вращения инструментальной головки  $n_2$  и заготовки  $n_u$  при  $P_6=7$  кг,  $\alpha=3^\circ$ ,  $T=6$  с.

Как видно из рис. 1.15, с увеличением частоты вращения инструментальной головки интенсивность роста шероховатости во всем диапазоне варьирования примерно одинакова. Вместе с тем, как видно из рис. 1.16, интенсивность исправления погрешностей геометрической формы ( $\Delta_{кр}$ ,  $W_z$ ) в диапазоне низких значений частот вращения инструментальной головки несколько выше, чем в диапазоне высоких значений. Так, с увеличением частоты вращения инструментальной головки с 70 об/мин до 140 об/мин, волнистость и отклонение от круглости уменьшаются в 1,25-1,35 раза, а при дальнейшем увеличении  $n_2$  со 140 об/мин до 220 об/мин эти параметры уменьшаются в 1,1-1,2 раза (рис. 1.16).

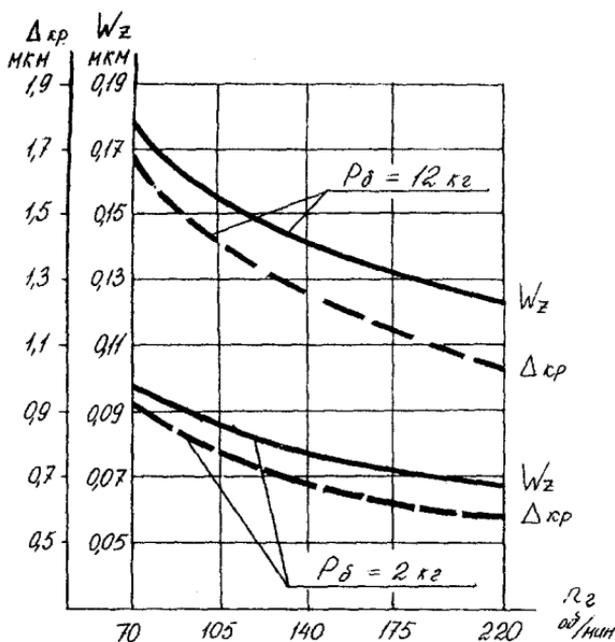


Рис. 1.16. Зависимость волнистости  $W_z$  и некруглости  $\Delta_{кр}$  обработанной поверхности от частоты вращения инструментальной головки  $n_2$  и силы давления брусков  $P_\delta$  при  $n_1 = 2900$  об/мин,  $\alpha = 3^\circ$ ,  $T = 6$  с.

Весьма значительное влияние на исследуемые параметры обработки оказывает величина давления брусков на обрабатываемую поверхность (рис. 1.17-1.19). Как видно из рисунка 1.17, с увеличением давления брусков производительность съема припуска и величина выпуклости профиля роликовой дорожки увеличиваются.

Это происходит потому, что при возрастании давления увеличивается размер площадки контакта бруска с изделием, соответственно увеличивается число активных режущих зерен и глубина их внедрения в обрабатываемую поверхность. Все это приводит к увеличению объема металла, срезаемого в единицу времени. При относительно малых углах скрещивания осей вращения заготовки и инструментальной головки

средняя часть брусков, в отличие от краевых участков, практически не отрывается от поверхности обработки, что затрудняет самозатачивание зерен и отвод продуктов резания на этом участке. Средняя часть брусков становится более засаленной по сравнению с их краями. Поэтому интенсивность съема металла в крайних зонах дорожки качения несколько выше, чем в любой другой зоне профиля. В результате этого с увеличением давления брусков возрастает величина выпуклости обрабатываемой поверхности.

При повышении скорости вращения изделия  $n_u$  общая тенденция изменения производительности съема припуска и величины выпуклости поверхности сохраняются, однако рост этих параметров происходит на более высоком уровне значений.

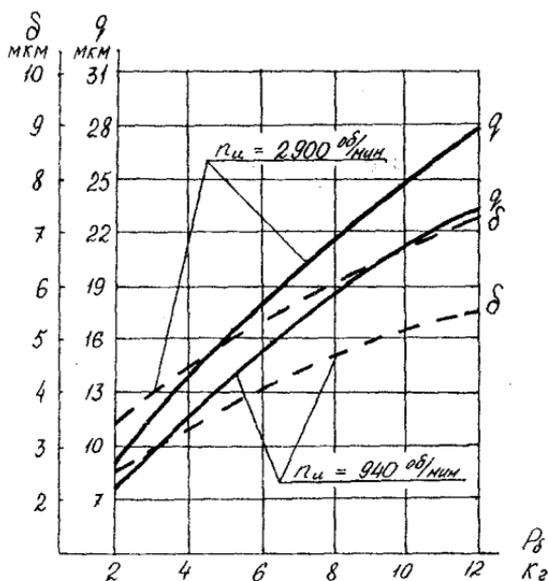


Рис. 1.17. Зависимость производительности  $q$  и величины выпуклости обработанного профиля  $\delta$  от силы давления брусков  $P_b$  на обрабатываемую поверхность и частоты вращения изделия  $n_u$ , при  $n_c = 120$  об/мин,  $\alpha = 3^\circ$ ,  $T = 6$  с.

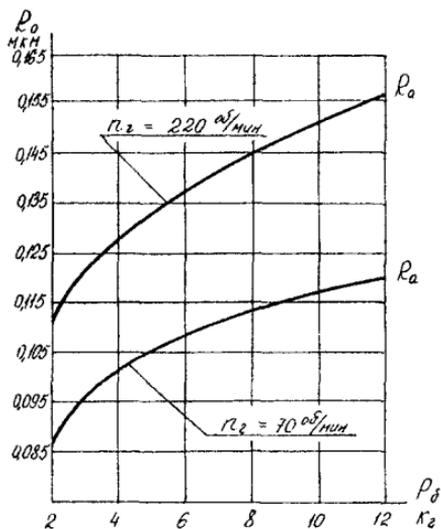


Рис. 1.18. Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от силы давления брусков  $P_\delta$  и частоты вращения инструментальной головки  $n_2$  при  $n_u=2900$  об/мин,  $\alpha=3^\circ$ ,  $T=6$  с.

На рисунке 1.18 предоставлены зависимости шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от силы давления брусков  $P_\delta$  и частоты вращения инструментальной головки  $n_2$ . Зависимости построены при частоте вращения изделия  $n_u=2900$  об/мин, угле наклона оси инструментальной головки  $\alpha=3^\circ$  и времени обработки  $T=6$  с. Как видно из графиков, при малых давлениях брусков шероховатость увеличивается более интенсивно, чем при больших давлениях. Это связано с тем, что при начальном росте величины давления брусков значительно увеличивается глубина внедрения абразивных зерен в поверхность обработки, что приводит к резкому росту высоты микронеровностей обработанной поверхности.

Дальнейшее увеличение давления уже не приводит к столь значительному росту глубины внедрения зерен, поэтому интенсивность увеличения шероховатости снижается. При высоких давлениях брусков

на их рабочей поверхности и на поверхности изделия образуются вырывы и наросты, что также способствует увеличению шероховатости. Кроме того, с повышением давления на бруски, очевидно, наблюдается эффект “жемчужного кольца”, который заключается в том, что некоторые частицы абразива выкрашиваются из структуры бруска и прокатываются между поверхностями бруска и изделия. Это приводит к увеличению волнистости и отклонения от круглости обработанной поверхности (рис. 1.19).

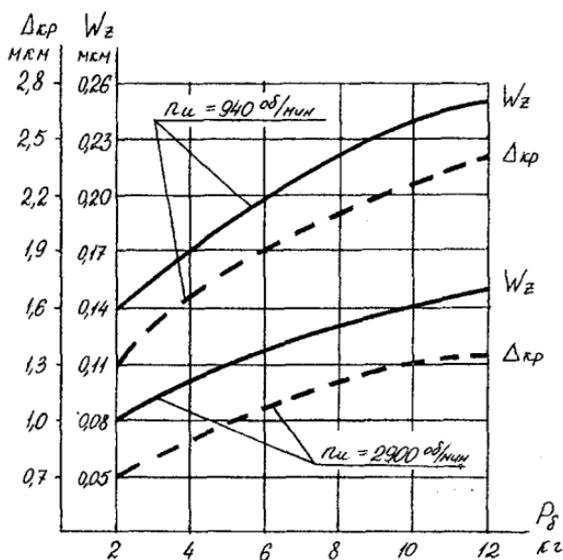


Рис. 1.19. Зависимость волнистости  $W_z$  и некруглости  $\Delta_{кр}$  обработанной поверхности от силы давления брусков  $P_{\delta}$  и частоты вращения  $n_{ц}$  при  $n_2 = 120$  об/мин,  $\alpha = 3^\circ$ ,  $T = 6$  с.

Влияние угла наклона инструментальной головки  $\alpha$  и частоты вращения изделия  $n_ц$  на величину выпуклости  $\delta$  и производительность съема припуска показано на рис. 1.20. Зависимости построены при частоте вращения инструментальной головки  $n_2 = 120$  об/мин, давлении брусков на обрабатываемую поверхность  $P_{\delta} = 7$  кг и времени обработки 6 секунд. Как

видно, с увеличением угла  $\alpha$  эффективность обработки возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением угла наклона инструментальной головки, при прочих равных условиях, уменьшается площадка контакта бруска с изделием, возрастает удельное давление зерен и они более глубоко внедряются в поверхность обработки.

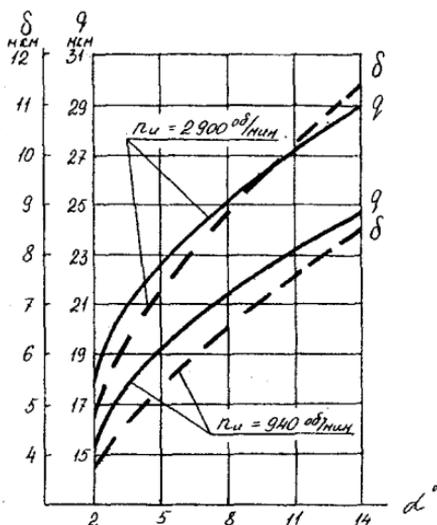


Рис. 1.20. Зависимость производительности  $q$  и величины выпуклости обработанного профиля  $\delta$  от угла наклона  $\alpha$  инструментальной головки и частоты вращения заготовки  $\nu_n$  при  $\nu_z = 120$  об/мин,  $P_0 = 7$  кг,  $T = 6$  с.

При этом свободная от контакта часть рабочей поверхности бруска получает возможность под действием смазывающе-охлаждающей жидкости более эффективно очищаться от продуктов резания, забившихся в порах связки, что приводит к улучшению условий самозатачивания зерен. Все это, несмотря на некоторое уменьшение количества активных зерен на площадке контакта, приводит к возрастанию производительности съема припуска и, как следствие, шероховатости обработанной поверхности (рис. 1.21).

При больших углах наклона инструментальной головки, в силу уменьшения размера площадки контакта бруска с изделием в осевом

сечении, возникает возможность более дифференцируемого ("точечного") воздействия отдельных участков режущей поверхности бруска на соответствующие участки поверхности обработки, что приводит к интенсификации профилирования и возрастанию величины выпуклости профиля.

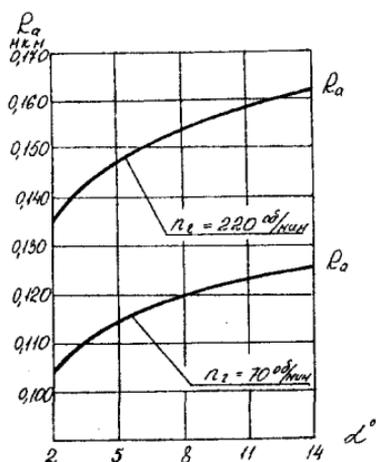


Рис. 1.21. Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от угла наклона  $\alpha$  инструментальной головки и частоты вращения инструмента  $n_2$  при  $n_1 = 2900$  об/мин,  $P_0 = 7$  кг,  $T = 6$  с.

Из рисунка 1.22 видно, что с увеличением угла  $\alpha$  уменьшается волнистость  $W_z$  и некруглость  $\Delta_{кр}$  обработанной поверхности. Это происходит оттого, что с возрастанием  $\alpha$  увеличивается толщина слоя металла, снимаемого с поверхности обработки в единицу времени, и появляется возможность исправления геометрических погрешностей, лежащих в пределах этого слоя.

Чем больше толщина снимаемого слоя, тем меньше амплитуда волнистости и некруглости, появляющиеся после обработки. Сравнивая полученные в работе зависимости с результатами исследования других авторов, следует отметить, что они не противоречат общепринятым представлениям о механизме влияния режимов суперфиниширования на

выходные параметры обработки. Некоторые расхождения результатов в сторону повышения величины съема вызваны увеличением числа активно режущих зерен, более лучшими условиями очистки режущей поверхности от стружки и шлама, а также хорошими условиями самозатачивания зерен. Многобрусовая схема обработки с кинематическим и силовым значением между брусками позволила значительно повысить исправляющую способность метода, который, по сравнению с традиционными, обеспечивает существенное снижение волнистости и отклонений от круглости обрабатываемой поверхности.

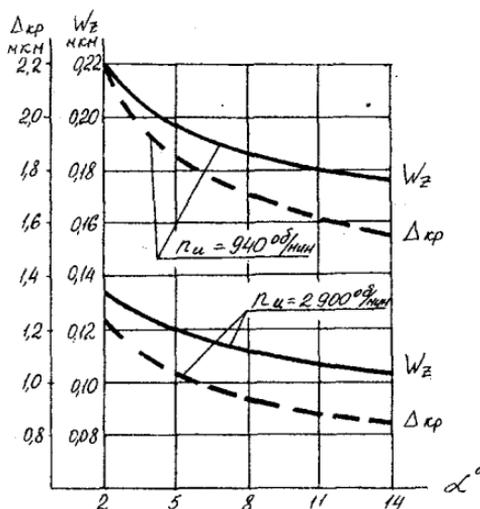


Рис. 1.22. Зависимость волнистости  $W_z$  и некруглости  $\Delta_{кр}$  обработанной поверхности от угла наклона  $\alpha$  инструментальной головки и частоты вращения заготовки  $n$ , при  $n_s = 120 \text{ об/мин}$ ,  $P_s = 7 \text{ кг}$ ,  $T = 6 \text{ с}$ .

Выполненные исследования позволили получить эмпирические модели, отражающие влияние на съем припуска, величину выпуклости, волнистость и отклонения от круглости обрабатываемой поверхности, времени обработки, зернистости и твердости инструмента:

$$\begin{aligned}
 q &= 1.465T^{0.305}HRA^{-0.336}Z^{1.249}, \\
 \delta &= 0.014T^{0.336}HRA^{0.587}Z^{1.605}, \\
 W_z &= 0.648T^{-0.905}HRA^{0.563}Z^{-0.823}, \\
 \Delta_{кр.} &= 0.396T^{-0.397}HRA^{0.801}Z^{-0.537}, \\
 R_a &= 0.039T^{-0.567}HRA^{0.157}Z^{0.785}.
 \end{aligned}
 \tag{1.61}$$

Зависимости получены при обработке на следующих режимах:  
 $n_n=2900$  об/мин,  $n_r=120$  об/мин,  $P_6=7$  кг,  $\alpha=3^\circ$ .

С увеличением времени обработки величина снимаемого припуска и выпуклость обрабатываемой поверхности увеличиваются (рис. 1.23).

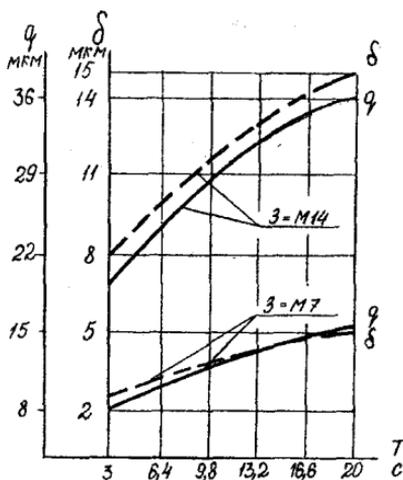


Рис. 1.23. Зависимость съема металла  $q$  и величины выпуклости  $\delta$  обрабатываемого профиля от времени обработки  $T$  и зернистости  $Z$  абразивных брусков при  $HRA=20$ .

При длительности доводки от 3 до 16 с. съем припуска и выпуклость профиля увеличиваются весьма интенсивно, при дальнейшем увеличении продолжительности обработки интенсивность роста этих показателей несколько снижается. Это говорит о том, что после 16-17 с. обработки режущие свойства абразивных брусков начинают снижаться в основном

за счет загупления или выпадания из связки абразивных зерен, а не в результате засаливания режущей поверхности инструмента продуктами резания.

Увеличение зернистости брусков с М7 до М14 приводит к повышению производительности обработки и величины выпуклости в среднем в 3 раза. При этом обработка мелкозернистым инструментом также носит незатухающий характер и является достаточно эффективной.

Увеличение времени обработки обеспечивает значительное снижение шероховатости, волнистости и отклонений от круглости обрабатываемых поверхностей (рис.1.24, 1.25). Наиболее резкое снижение этих параметров наблюдается при обработке в течение первых 15 с, дальнейшее увеличение времени доводки не приводит к существенному уменьшению указанных показателей.

Сравнивая данные зависимости с аналитическими зависимостями (рис.4.17) – ч.2, полученными при обработке осциллирующим инструментом, можно отметить, что доводка вращающимися брусками более производительна и обладает повышенными формообразующими возможностями. При одном и том же времени цикла, данный метод обеспечивает более высокую интенсивность съема припуска и точность геометрической формы заготовок в продольном и поперечном сечениях. Одной из причин, способствующих увеличению точности обработки, может служить значительное снижение виброактивности технологического оборудования, в результате отсутствия в станках осциллирующих механизмов. Вместе с тем, как показали теоретические исследования, увеличение количества одновременно работающих брусков приводит к снижению жесткости резания, что, в свою очередь, обеспечивает уменьшение высоты гармоник, оставшихся на обрабатываемой поверхности после доводки. Кроме того, использование многобрусковой схемы дает возможность увеличить количество активно режущих зерен и соответственно повысить съем металла в единицу времени, что хорошо подтверждается сравнением графиков на рис.1.23 и 4.22 (ч.2 ).

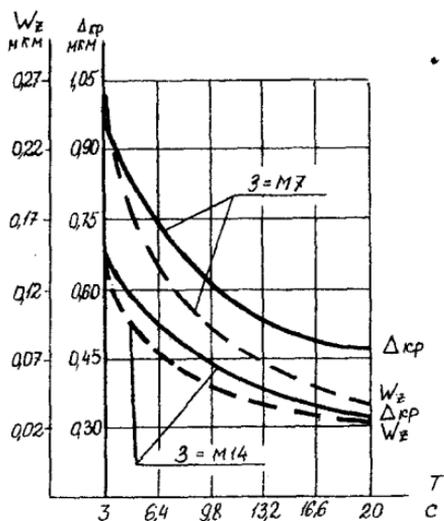


Рис. 1.24. Зависимость волнистости  $W_z$  и отклонений от круглости  $\Delta_{кр}$  обработанной поверхности от времени обработки  $T$  и зернистости абразивных брусков  $Z$  при  $HRA=20$

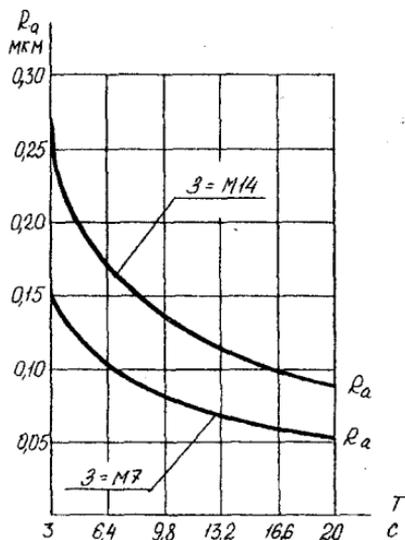


Рис. 1.25. Зависимость шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности от времени обработки  $T$  и зернистости абразивных брусков  $Z$  при  $HRA=20$ .

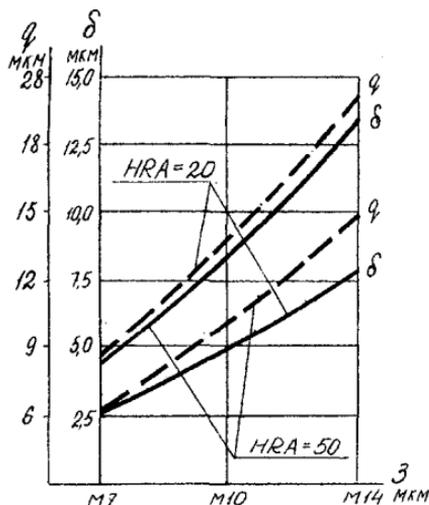


Рис. 1.26. Зависимость съема металла  $q$  и величины выпуклости  $\delta$  обработанного профиля от зернистости  $z$  и твердости HRA инструмента при  $T=3$  с.

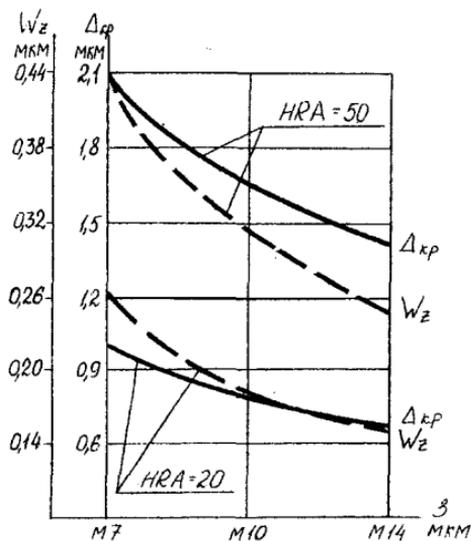


Рис. 1.27. Зависимость волнистости  $W_z$  и отклонения от круглости  $\Delta_{кр}$  обрабатываемой поверхности от зернистости  $z$  и твердости HRA инструмента при  $T=3$  с.

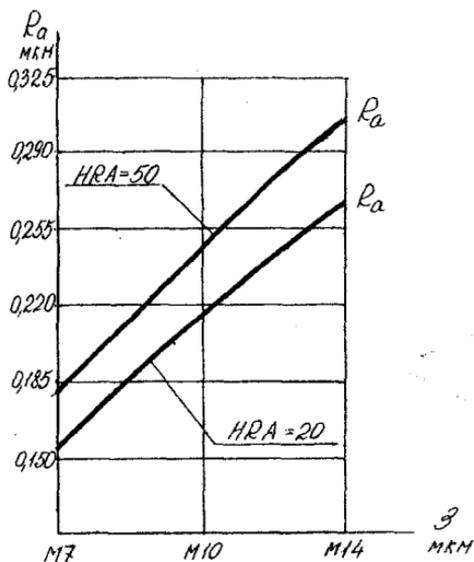


Рис. 1.28. Зависимость шероховатости  $R_a$  обрабатываемой поверхности от зернистости  $Z$  и твердости  $HRA$  инструмента при  $T=3$  с.

Как видно из рис. 1.23-1.28, с увеличением зернистости брусков съема металла, величина выпуклости и шероховатость обрабатываемой поверхности увеличиваются, а волнистость и отклонение от круглости уменьшаются. Это связано, как уже было отмечено ранее, с увеличением глубины внедрения абразивных зерен в металл и возрастанием объема стружки, удаляемой единичным абразивным зерном.

Увеличение твердости брусков (рис. 1.29-1.31) приводит к относительному снижению производительности обработки и увеличению выпуклости профиля, волнистости и отклонений от круглости обрабатываемой поверхности. Шероховатость поверхности обработки при этом также увеличивается. С увеличением твердости абразивного инструмента снижается возможность эффективного самозатачивания зерен, происходит быстрое их затупление, затруднено выпадение затупившихся зерен из связки и их скалывание, ухудшается прирабатываемость брусков к обрабатываемой поверхности.

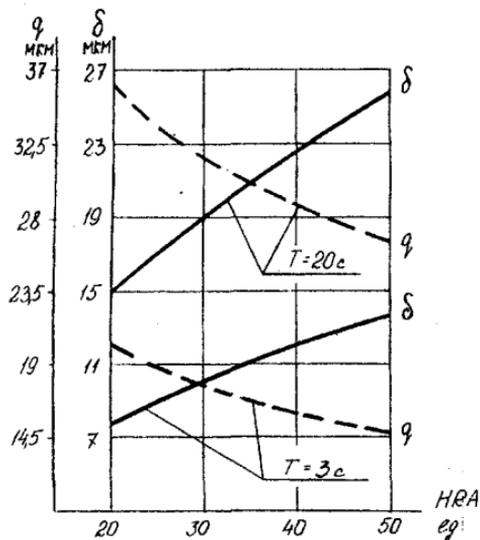


Рис. 1.29. Зависимость съема металла  $q$  и величины выпуклости  $\delta$  обработанного профиля от твердости HRA инструмента и времени обработки  $T$  при  $3=M14$ .

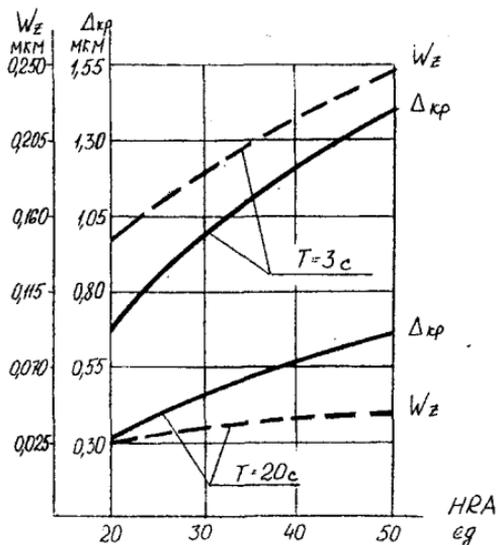


Рис. 1.30. Зависимость волнистости  $W_z$  и отклонений от круглости  $\Delta_{кр}$  обработанной поверхности от твердости HRA инструмента и времени обработки  $T$  при  $3=M14$ .

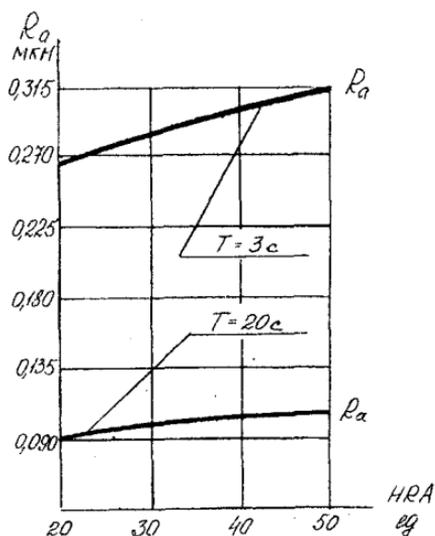


Рис. 1.31. Зависимость шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности от твердости HRA инструмента и времени обработки  $T$  при  $Z=M14$ .

Все это способствует снижению производительности обработки и ее точностных показателей. Однако при этом возрастает точность профилирования обрабатываемой поверхности в связи с более длительным сохранением рабочей поверхностью инструмента своей первоначальной геометрической формы. Следует отметить, что выявленные закономерности не противоречат ранее сделанным выводам и хорошо соответствуют результатам теоретических исследований.

На основе применения методов линейного программирования определили оптимальные значения технологических факторов процесса, обеспечивающих максимальную производительность съема припуска, точность и качество обрабатываемых поверхностей: частота вращения заготовки - 2900 об/мин, частота вращения инструментальной головки - 120 об/мин, угол скрещивания осей вращения инструмента и заготовки -  $3^\circ$ , давление брусков на обрабатываемую поверхность - 6 кг.

## **2. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРОФИЛЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ НА ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ**

### **2.1. Обоснование рациональной геометрической формы профиля дорожек качения колец подшипников**

Анализ современных конструктивных разновидностей подшипников качения в условиях их крупносерийного производства позволяет сформулировать следующие требования к конструкции подшипников, которую можно считать более рациональной с точки зрения внутренней геометрии, по сравнению с существующими:

1. Повышенные эксплуатационные свойства, полученные за счет обеспечения наиболее благоприятных условий контактирования рабочих поверхностей колец и тел качения путем оптимизации геометрической формы их профилей.
2. Повышенная универсальность, т.е. способность сохранять высокие эксплуатационные свойства при работе в широком диапазоне нагрузок и скоростей.
3. Высокая технологичность, позволяющая без увеличения затрат в кратчайшие сроки организовать высокоэффективное производство изделий данной конструкции.
4. Высокопроизводительная обработка и сборка.

Поэтому под оптимальной формой дорожек и тел качения подшипников будем понимать такую, при которой обеспечивается максимально возможная работоспособность подшипника во всем диапазоне условий его работы и относительно невысокая трудоемкость его изготовления. Для специальных подшипников с узким диапазоном условий работы оптимизировать форму профиля рабочих поверхностей проще, так

как выпуск таких подшипников, как правило, невелик и, следовательно, можно использовать специальные методы обработки и более сложную в технологическом отношении геометрию дорожек и тел качения. Для универсальных подшипников, изготавливаемых в массовом порядке, форма рабочих поверхностей их деталей должна обеспечивать не только повышенную работоспособность, но и высокопроизводительную обработку и сборку.

Известно, что работоспособность подшипников качения во многом зависит от величины максимальных контактных напряжений и от размеров площадки контакта, которые определяются формой зазора между контактирующими поверхностями [49-62]. Следовательно, на первых этапах исследования оптимальной формы профиля рабочих поверхностей подшипника можно за критерий оптимальности принять форму начального зазора, а также размеры площадки контакта и величину максимальных контактных напряжений.

Как показывает практика, в наиболее сложных контактных условиях работают детали роликоподшипников. Наличие эксплуатационных и монтажных перекосов колец приводит к преждевременному выходу подшипников из строя. Поэтому оптимизация формы профиля рабочих поверхностей деталей роликоподшипников, с целью снижения отрицательного влияния перекосов, является наиболее актуальной.

В наиболее общем виде форму рационального зазора между роликом и дорожкой качения в главных сечениях при отсутствии их перекоса можно выразить параболой  $n$ -го порядка (рис.2.1) :

$$\begin{aligned} Z_p - Z_g &= Ax^n; \\ Z_p - Z_g &= By^2, \end{aligned} \tag{2.1}$$

где  $Z_p, Z_g$  - ординаты соответствующих поверхностей ролика и дорожки качения;

$x, y$  - расстояние от начальной точки контакта соответственно в поперечном и продольном сечениях подшипника;  
 $n$  - показатель степени;  
 $A, B$  - коэффициенты формы.

Величина  $B$  зависит от диаметра дорожки  $D_g$  и ролика  $d_g$ . Изменяя величины  $A$  и  $n$  в выражении (2.1), можно изменять форму начального зазора и распределение контактных напряжений на поверхности контакта [49].

При  $n=0$  ролик и дорожка качения соприкасаются по всей длине. Они могут иметь прямолинейные или криволинейные образующие равной кривизны.

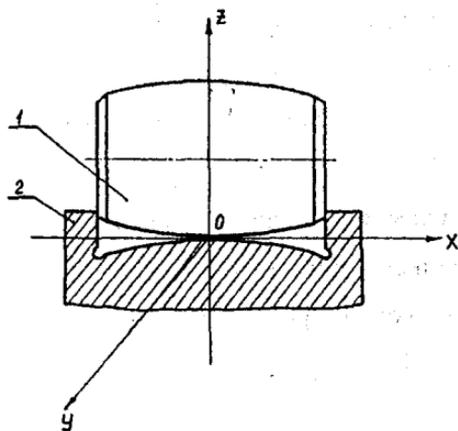


Рис. 2.1. Схема контакта рабочих поверхностей роликоподшипника при отсутствии перекосов: 1 - ролик; 2 - кольцо

При  $n=2$  профили роликов и дорожки примерно очерчиваются дугами окружности, либо одна из контактирующих поверхностей может иметь прямолинейную образующую. Контактные напряжения распределяются по закону полуэллипсоида, так что в центре площадки контакта они в 1.5 раза больше средних (рис.2.2).

При  $n=4$  форма зазора в поперечном сечении подшипника описывается параболой 4-й степени. Под нагрузкой образуется эллиптическая площадка контакта, а контактные напряжения вдоль большой оси распределяются примерно равномерно (см. рис.2.2).

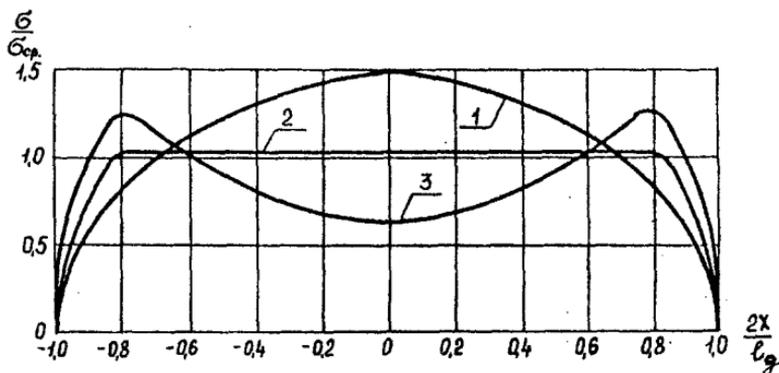


Рис.2.2. Распределение контактных напряжений на поверхности контакта тел параболической формы  $n$ -й степени: 1 -  $n=2$ ; 2 -  $n=4$ ; 3 -  $n=6$

При  $n=6$  под нагрузкой образуется эллиптическая площадка контакта, а эпюра контактных напряжений представляет собой двугорбую кривую (см. рис.2.2).

Таким образом, при отсутствии перекоса между наружным и внутренним кольцом и симметричном профиле дорожки и тел качения наиболее благоприятное распределение контактных напряжений обеспечивает форма начального зазора в поперечном сечении в виде параболы 4-го порядка. Такая форма гарантирует от концентрации контактных напряжений по краю площадки контакта, которая может наблюдаться при начальном соприкосновении ролика и дорожки по всей длине ( $n=0$ ).

Однако случай, когда поверхности дорожек качения наружного и внутреннего колец не имеют перекосов, является нереальным. За счет

неточности изготовления деталей роликоподшипника и подшипниковых узлов механизмов и машин, подшипники всегда работают с перекосом колец, который приводит к существенному перераспределению контактных напряжений. Поэтому оптимизацию геометрической формы рабочих поверхностей деталей роликоподшипника следует производить с учетом возможного перекоса колец [53, 54, 59, 60].

На рис.2.3 изображено поперечное сечение роликоподшипника. Ось дорожки качения наружного кольца 1 подшипника наклонена к оси дорожки качения внутреннего кольца 2 под углом  $\Theta$ . Под действием перекоса колец ось ролика 3 поворачивается в вертикальной плоскости и составляет угол  $\lambda=0.5\Theta$  с осями дорожек качения как внутреннего, так и наружного колец.

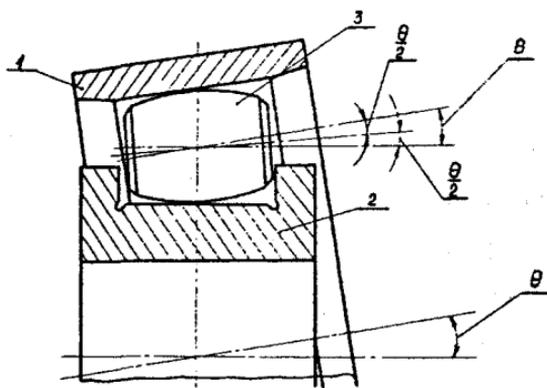


Рис.2.3. Поперечное сечение роликоподшипника при перекосе осей его колец: 1 - наружное кольцо; 2 - внутреннее кольцо; 3 - ролик

Построим неподвижную относительно ролика  $Z_H O_H X_H$  и подвижную ZOX системы координат. Начало неподвижной системы координат расположим на вершине профиля ролика. Ось  $O_H Z_H$  расположим перпендикулярно оси ролика, ось  $O_H X_H$  - параллельно этой оси. Начало O подвижной системы координат расположим в начальной точке контакта

ролика и дорожки качения. Ось  $OZ$  направим по нормали к поверхностям контакта, ось  $OX$  - по касательной к этим поверхностям (рис.2.4).

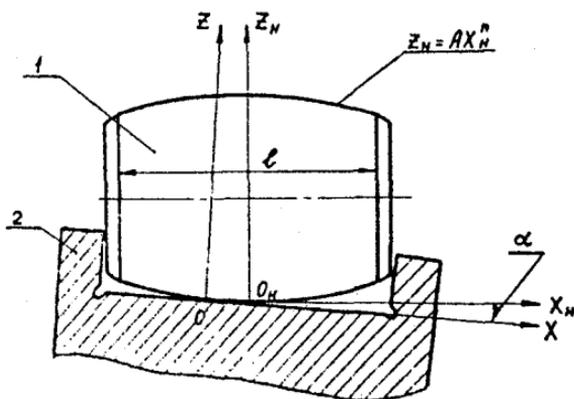


Рис.2.4. Схема для расчета относительной величины смещения начальной точки контакта в зависимости от угла перекоса  $\Theta$  и показателя формы  $n$ : 1 - ролик; 2 - кольцо

При прямолинейной образующей дорожки качения форма зазора определяется формой профиля ролика. Из выражения (2.1) имеем:

$$Z_H = AX_H^n, \quad (2.2)$$

где  $X_H, Z_H$  - координаты профиля ролика в неподвижной системе координат.

Система координат  $ZOX$  повернута относительно системы координат  $Z_N O_N X_N$  на угол  $\alpha$  (см. рис.2.4), а ее центр смещен вдоль осей неподвижной системы соответственно на величину  $X_0$  и  $Z_0$ . В таком случае неподвижная система координат связана с подвижной следующим образом:

$$\begin{cases} Z_H = Z \cos \alpha + X \sin \alpha + Z_0 \\ X_H = X \cos \alpha + Z_0 - Z \sin \alpha \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $X_0, Z_0$  - координаты центра подвижной системы координат в неподвижной системе.

Определим  $X_0$  и  $Z_0$ . Для этого найдем производную функции (2.2):

$$Z'_{II} = AnX_{II}^{n-1}.$$

При  $X_{II} = X_0$ ,  $Z'_{II} = \operatorname{tg}\alpha$ . Таким образом,

$$\operatorname{tg}\alpha = AnX_0^{n-1},$$

откуда

$$X_0 = \left( \frac{\operatorname{tg}\alpha}{An} \right)^{\frac{1}{n-1}}. \quad (2.4)$$

С учетом выражения (1.2)

$$Z_0 = AX_0^n = A \frac{1}{n-1} \left( \frac{\operatorname{tg}\alpha}{n} \right)^{\frac{n}{n-1}}. \quad (2.5)$$

Подставляя выражение (2.3) в равенство (2.2), с учетом принятых обозначений (2.4) и (2.5) получим:

$$Z = \frac{1}{\cos\alpha} \left\{ A(X \cos\alpha + X_0 - Z \sin\alpha)^n - x \sin\alpha - Z_0 \right\}. \quad (2.6)$$

Выражение (2.6) дает возможность рассчитать величину начального зазора  $Z$  между профилями ролика и дорожки качения в условиях перекоса колес. Выражение (2.4) показывает величину смещения начальной точки контакта ролика и дорожки качения от оси симметрии подшипника под действием перекоса колес.

Для того чтобы проанализировать форму начального зазора между роликом и дорожкой, зададимся неизменной величиной зазора по краю площадки контакта  $Z$ , при отсутствии перекоса колес.

Тогда из выражения (2.2)

$$A = Z \left( \frac{2}{lp} \right)^n, \quad (2.7)$$

где  $lp$  - эффективная длина ролика.

Подставляя выражение (2.7) в равенство (2.4), найдем:

$$X_0 = \left(\frac{lp}{2}\right)^{\frac{n}{n-1}} \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha}{nZ_3}\right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (2.8)$$

На рис. 2.5 показана величина смещения  $X_0$  начальной точки контакта от центра симметрии профиля дорожки качения роликоподшипника 32206 в отношении к ее полудлине  $lp/2$  в зависимости от угла перекоса колец  $\Theta=2\alpha$  и различных  $n$  при равном зазоре  $Z_3=0.01$  мм по краю дорожки, что примерно соответствует рекомендациям ВНИИП. При  $2X_0/lp=1$  начальная точка контакта приходится на кромку дорожки качения, что недопустимо.

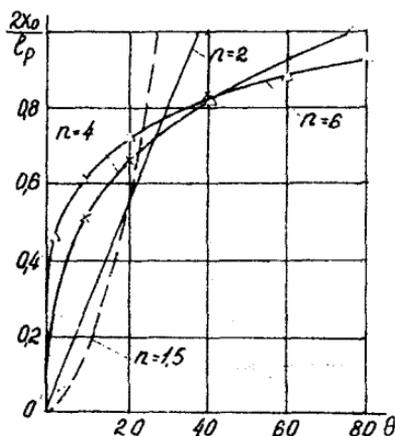


Рис. 2.5. Зависимость относительной величины смещения начальной точки контакта  $2X_0/lp$  от угла перекоса колец  $\Theta$  и показателя формы  $n$

На рис. 2.6, 2.7, 2.8 приведены графики, показывающие зависимость зазора  $Z$  между профилями ролика и дорожки качения роликоподшипника 32206 от расстояния до центра симметрии дорожки  $X$  при различных значениях  $n$  и углов перекоса. Как видно, при  $\Theta=10'$  и  $\Theta=30'$  значения  $n=4$  и  $n=6$  более благоприятны с точки зрения изменения зазора между контактирующими телами.

В этом случае с увеличением нагрузки на контакт преобладающий рост площадки контакта будет направлен в сторону оси симметрии дорожки качения, и выхода пятна контакта на ее кромку не произойдет. При  $n=2$  рост площадки контакта в процессе увеличения нагрузки будет симметричным и не исключена возможность выхода площадки соприкосновения на кромку роликовой дорожки. Таким образом, если профиль начального зазора между роликом и дорожкой качения обеспечить в виде параболы 4-6-й степени, то работоспособность роликоподшипника может существенно увеличиться. Окончательно выбор параметров профиля дорожек и тел качения следует производить по результатам измерения размеров площадки контакта при различных нагрузках и испытаниях подшипников на стендах.

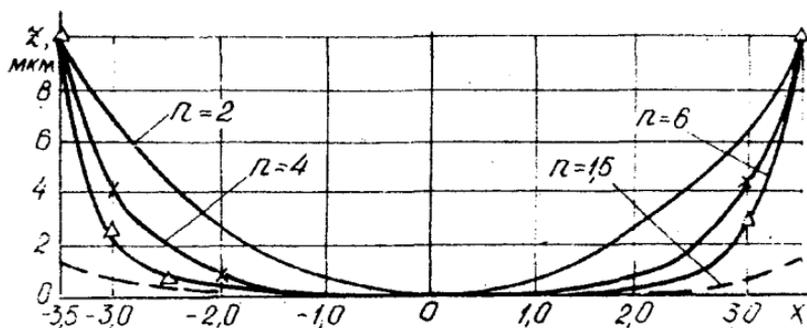


Рис. 2.6. Зависимость начального зазора  $Z$  между дорожкой качения и роликом от расстояния  $X$  до оси симметрии дорожки при отсутствии перекоса колец

Как показывает анализ литературных данных, для устранения отрицательных явлений на контактных поверхностях роликовых подшипников достаточно придать рациональную геометрическую форму либо профилю роликов, либо профилю роликовых дорожек наружного и внутреннего колец [50-54]. Обычно профилируют ролики, так как это проще в технологическом отношении.

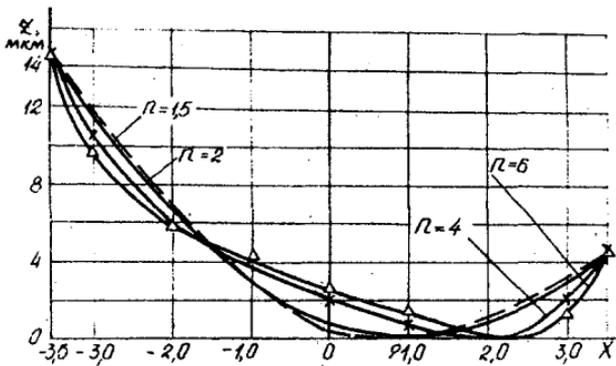


Рис. 2.7. Зависимость начального зазора  $Z$  между дорожкой качения и роликом от расстояния  $X$  до оси симметрии дорожки при угле перекоса  $\Theta = 10'$

Дорожки же качения колец стремятся изготавливать с прямолинейной образующей. При этом считается, что достижение наилучших условий контактирования возможно лишь в том случае, когда профильная поверхность роликов будет находиться в контакте с цилиндрической поверхностью роликовых дорожек колец, имеющей строго прямолинейную образующую, т.е. при отсутствии погрешностей геометрической формы (в пределах, установленных стандартом) таких, как вогнутость, волнистость, конусность. Как отмечалось ранее, присутствие таких погрешностей, по меньшей мере на одной из рабочих поверхностей, приводит к снижению несущей способности контакта, ускорению усталостных разрушений и быстрому выходу подшипника из строя, даже в том случае, когда сопряженная с ней поверхность имеет самый оптимальный профиль. Поэтому, для обеспечения наиболее эффективного контакта профильной поверхности с прямолинейной, стремятся изготовить образующую последней с предельной точностью.

Точностные и качественные характеристики деталей подшипников, как известно, окончательно формируются на заключительных стадиях обработки, таких как шлифование и суперфиниширование. Для роликов

такой стадией чаще всего является бесцентровое шлифование рабочей поверхности. На этом этапе обработки формируются геометрические параметры профиля, шероховатость, качество поверхностного слоя. Бесцентровое шлифование, в силу своих кинематических особенностей, обеспечивает высокую геометрическую точность прямолинейного профиля обрабатываемой поверхности и практически исключает образование на нем волнистости и вогнутости.

Заключительная стадия обработки дорожек качения колец с бортами состоит из двух этапов: шлифования врезанием и суперфиниширования. На операции суперфиниширования происходит некоторое исправление погрешностей геометрической формы в продольном сечении роликовой дорожки, улучшается шероховатость и качество поверхностного слоя. Исправления же погрешностей формы в поперечном сечении дорожки качения в результате прирабатываемости абразивных брусков почти не происходит. Эти погрешности либо копируются, либо формируются заново. К тому же кинематические особенности применяемых методов брускового суперфиниширования таковы, что в процессе обработки не исключена возможность образования вогнутости обрабатываемого профиля, что категорически запрещается стандартами.

Из вышесказанного следует, что при существующих технологических процессах окончательной обработки рабочих поверхностей роликов и колец значительно проще обеспечить высокую точность прямолинейного профиля роликов, нежели дорожек качения. С этой точки зрения, при наличии надежного способа формообразования, выгоднее профилировать дорожки качения, а профиль роликов делать либо прямолинейным, либо упрощенно модифицированным.

Изложенное выше, а также исследование [50] позволили разработать новую конструкцию роликоподшипника [49], отличающуюся от известных

формой профиля роликовой дорожки, которую выполняют в виде кривой, описываемой уравнением [51-58]:

$$Z = R_6 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_6^2}} \right) - Ax^n, \quad (2.9)$$

где  $Z$  - ордината произвольной точки профиля, мм;

$X$  - абсцисса произвольной точки профиля, мм;

$R_6$  - радиус профиля тела качения в осевом сечении, мм;

$A$  - коэффициент формы, зависящий от радиуса тела качения в осевом сечении:

$$A = \frac{0.03}{(0.1 \dots 0.3)^{n-2} \cdot (2R_6)^{n-1}}, \text{ мм}^{n-1};$$

$n$  - показатель формы  $3 \leq n \leq 6$ .

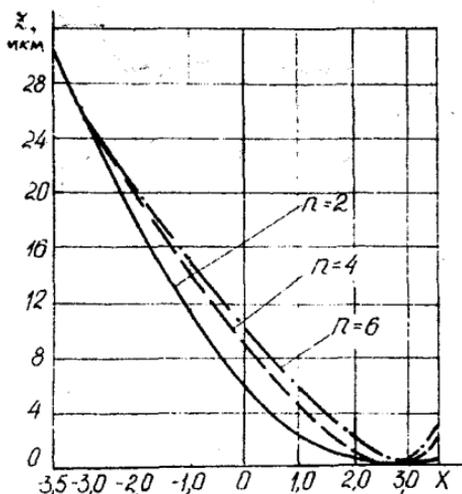


Рис. 2.8. Зависимость начального зазора  $Z$  между дорожкой качения и роликом от расстояния  $X$  до оси симметрии дорожки при угле перекоса  $\Theta=30'$

В случае, когда профиль ролика имеет прямолинейную образующую (рис. 2.9), формула (2.9) принимает следующий вид:

$$Z = Ax^n .$$

При  $n < 3$  (см. рис.2.6) в случае отсутствия перекосов площадка контакта ролика и дорожки качения с увеличением нагрузки увеличивается очень медленно. Даже при умеренных нагрузках из-за малого размера площадки соприкосновения возможны значительные удельные давления. Это приводит к снижению несущей способности, грузоподъемности и долговечности.

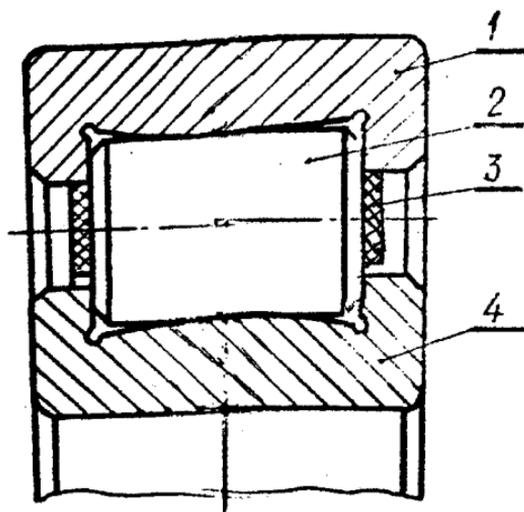


Рис 2.9. Роликоподшипник с цилиндрическими роликами и оптимизированным профилем дорожек качения: 1 - наружное кольцо; 2 - цилиндрический ролик; 3 - сепаратор; 4 - внутреннее кольцо

С увеличением показателя формы ( $n > 3$ ) при росте нагрузки область контакта увеличивается очень быстро, в связи с этим снижаются удельные давления, растет несущая и нагрузочная способность, повышается долговечность подшипника. Однако при слишком высоких значениях показателя формы ( $n > 6$ ) в случае работы подшипника с максимальной нагрузкой, когда в контакте находится вся рабочая зона роликовой дорожки, не исключена возможность появления краевого эффекта, т.е.

резкого возрастания напряжений в зонах, прилегающих к краям дорожки качения. Это происходит из-за того, что кривизна крайних зон профиля при  $n > 6$  слишком высока и не обеспечивает необходимой плавности роста удельных давлений при критических нагрузках. Об этом свидетельствует форма площадки контакта с резкими расширениями по краям.

Однако в тех случаях, когда роликовые подшипники работают при низких радиальных нагрузках, в условиях малых перекосов, но от них требуется повышенная жесткость (шпиндельные узлы станков), параболическая форма профиля дорожек качения с показателем  $n > 6$  может быть наиболее выгодной. Обычно в подшипниках качения с увеличением площадки контакта уменьшаются удельные напряжения, увеличивается нагрузочная способность, снижается возможность усталостного разрушения, но при этом возрастает момент трения и износ рабочих поверхностей и наоборот. Предлагаемая конструкция подшипника позволяет одновременно снизить и величину контактных напряжений, и размер большой оси площадки контакта, что способствует значительному увеличению грузоподъемности и долговечности роликовых подшипников без увеличения эффективной длины ролика и дорожки качения.

Для иллюстрации сказанного можно привести экспериментальные данные, полученные при радиальном вдавливании шарика диаметром 9.53 мм в дорожку качения внутренних колец шарикоподшипника 206. Вдавливанию подвергались стандартные кольца с желобами круговой формы и кольца с желобами, имеющими профиль в виде парабол с показателями формы  $n=3$  и  $n=6$ . При этом по отпечаткам замерялись размеры больших  $b$  и малых  $a_k$  полуосей площадок контакта и подсчитывались средние значения контактных напряжений, как отношение нормальной сжимающей силы  $P_{ис}$  к площади эллипса контакта. Полученные данные представлены в табл. 2.1.

**Размеры площадок контакта и средние контактные напряжения  
при нормальном сжатии тела качения с дорожкой**

Контролируемые параметры	Опытные конструкции	Нагрузка на шарик, кг				
		100	200	300	400	500
Среднее контактное напряжение, кг/мм <sup>2</sup>	стандартная предлагаемая, n=3 предлагаемая, n=6	125	160	183	200	215
		100	142	165	184	200
		105	142	169	191	210
Большая полуось b площадки контакта, мм	стандартная предлагаемая, n=3 предлагаемая, n=6	1.70	2.15	2.46	2.71	2.92
		1.81	2.15	2.38	2.56	2.70
		2.14	2.36	2.51	2.61	2.70
Малая полуось a <sub>к</sub> площадки контакта, мм	стандартная предлагаемая, n=3 предлагаемая, n=6	0.15	0.19	0.21	0.23	0.25
		0.16	0.21	0.24	0.27	0.29
		0.14	0.19	0.23	0.26	0.29

Как видно из табл. 2.1, предлагаемая конструкция профиля позволяет при нагрузке свыше 500 кг, которая для данного стандартного подшипника является предельной, уменьшить и средние контактные напряжения, и размер большой оси площадки контакта при некотором увеличении размера малой оси, которая не оказывает на трение существенного влияния.

А так как долговечность подшипника в 9-10-й степени зависит от величины контактных напряжений, то предлагаемая конструкция профиля дорожки качения обеспечивает, как минимум, в 3-5 раз повышение работоспособности подшипника, снижение момента трения и увеличение предельной грузоподъемности.

В табл.2.1 представлены данные, относящиеся к определенному типоразмеру шариковых подшипников, однако наблюдаемые тенденции изменения размеров площадки контакта и средних нормальных напряжений с ростом радиальной нагрузки будут характерны и для роликовых подшипников, имеющих аналогичный профиль дорожки качения.

На рис.2.10 показаны зависимости начального зазора  $Z_n$  между телом и дорожкой качения внутреннего кольца подшипника от расстояния  $X$  до начальной точки контакта при круговом (кривая 1) и параболическом профилях (кривые 2 и 3) при обеспечении формы начального зазора в виде параболы 4-й (кривая 2) и 5-й (кривая 3) степени. Для наглядности параметры кривых подобраны таким образом, чтобы они пересекались в одной точке. Величина зазора  $Z_n$  подсчитывалась по формулам:

- для кругового профиля (кривая 1):

$$Z_n = r_T \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{X^2}{r_T^2}} \right) - r_n \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{X^2}{r_n^2}} \right),$$

где  $r_T = 4,765$  мм - радиус тела качения;

$r_n = 4,908$  мм - радиус дорожки качения;

- для параболического профиля:

$$Z_n = r_T \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{X^2}{r_T^2}} \right) - Ax^n,$$

где  $n = 4$ ,  $A = 8,75 \cdot 10^{-4}$  - кривая 2;

$n = 5$ ,  $A = 5,2 \cdot 10^{-4}$  - кривая 3.

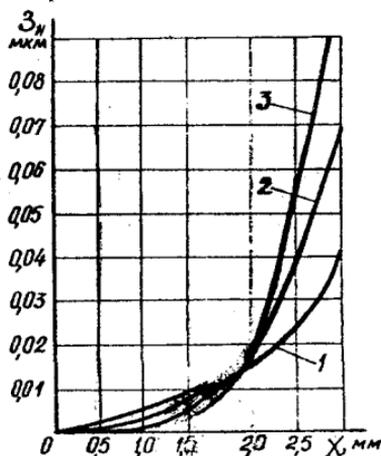


Рис. 2.10. Зависимость начального зазора между телом и дорожкой качения внутреннего кольца подшипника от расстояния  $X$  до начальной точки контакта при круговом и параболическом профиле дорожки качения: 1 - круговой профиль; 2 - параболический профиль с  $n = 4$ ; 3 - параболический профиль с  $n = 5$

Как видно из рис.2.10, параболический профиль дорожки качения (кривые 2 и 3) в окрестности начальной точки контакта обеспечивает существенно меньшую величину зазора, чем круговой профиль (кривая 1), и это дает возможность при малых нагрузках получать большой размер площадки контакта, снижение средних контактных напряжений и повышение долговечности подшипника. При  $X > 2$  величина начального зазора резко возрастает, а это означает, что при повышенной нагрузке размер большой оси площадки контакта у подшипников предлагаемой конструкции будет несколько меньше, чем у подшипника с круговым профилем дорожки качения. Таким образом, при одинаковой величине выпуклости у роликового подшипника с круговым профилем дорожки качения пятно контакта выйдет на ее кромку при значительно меньшей радиальной нагрузке, чем у подшипника, имеющего параболический профиль роликовой дорожки, а значит, последний будет иметь более высокую нагрузочную способность и долговечность в широком диапазоне давлений. Зависимость средних контактных напряжений от нагрузки для различных конструкций подшипников графически изображена на рис. 2.11.

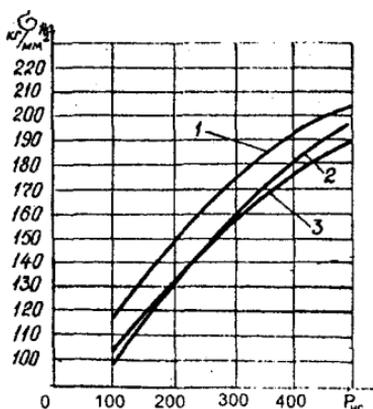


Рис. 2.11. Зависимость средних контактных напряжений  $\sigma_{ср}$  от нагрузки  $P_{нс}$  для различных конструкций профилей: 1 - круговой профиль дорожки качения; 2 - параболический профиль с  $n = 3$ ; 3 - параболический профиль с  $n = 6$

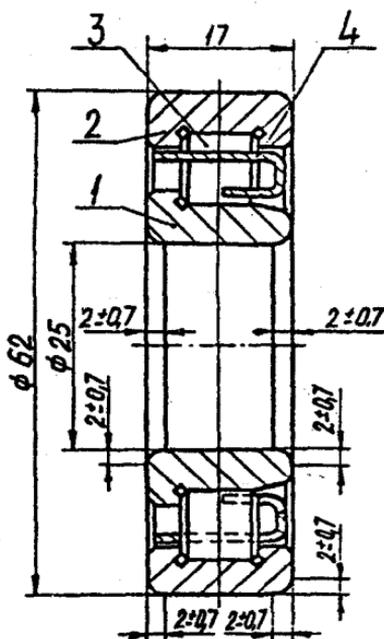
Как видно, параболический профиль третьей и шестой степени обеспечивает на 7 - 17% снижение средних контактных напряжений во всем диапазоне внешних нагрузок по сравнению с круговым профилем дорожки качения.

Так как предлагаемый геометрический профиль дорожки качения определяется всего двумя параметрами ( $A$  и  $n$ ), то эти параметры легко оптимизировать для самого широкого диапазона внешних условий работы подшипника. Поэтому подшипники данной конструкции должны изготавливаться не только как специальные, но и как широко универсальные, а это способствует снижению трудоемкости их изготовления. Особенно значительно трудоемкость изготовления подшипников предлагаемой конструкции снижается по сравнению с трудоемкостью изготовления подшипников, профиль дорожек и тел качения которых очерчен сочетанием различных круговых и прямых линий, так как известно, что деталь с плавным профилем изготовить значительно легче, чем деталь с профилем, имеющим несколько точек перегиба.

## **2.2. Объект и условия проведения стендовых испытаний, измерительные приборы и оборудование**

Для проверки работоспособности предлагаемых конструкций роликоподшипников были проведены сравнительные стендовые испытания, которые проходили в условиях испытательной станции ОАО СПЗ-3 [50].

В качестве объекта исследований выбран роликоподшипник №42305, как наиболее типичный и массовый „представитель“ данной конструктивной разновидности, имеющий широкое применение в различных отраслях промышленности (рис.2.12).



Объем	Наименование	Кол.	Матер.
1	Кольцо наружное	1	Сталь ШХ-5 ГОСТ 801-60
2	Кольцо внутреннее	1	Сталь ШХ-15 ГОСТ 801-60
3	Ролик 9x9мм; (9x11мм)	11	Сталь ШХ-15 ГОСТ 801-60
4	Сепаратор	1	Сталь ШХ-15 ГОСТ 503-51

Рис. 2.12. Роликовый подшипник 42305

Для испытаний были подготовлены пять опытных партий подшипников, детали которых изготавливались из материала одной плавки.

Первая партия содержала подшипники 66-42305АМ с увеличенной, за счет уменьшения толщины бортов, длиной прямолинейной образующей рабочих поверхностей колец и роликов, имеющих размеры 9x11мм (диаметр  $d_p$ , длина). Подшипники данной конструкции серийно

выпускаются заводом и были отобраны случайным образом на сборочном участке цеха. Они изготовлены по 6-му классу точности ГОСТ 520 71\* и собраны с радиальным зазором по 6-му ряду /наим.-10мкм, наиб.-45мкм/.

Вторая партия с индексом 423050П2 состояла из подшипников, имеющих внутренние кольца сборной конструкции, с прямолинейной образующей рабочих поверхностей дорожек и тел качения стандартной длины /9x9 мм/. Дорожка качения внутренних колец была обработана на бесцентровом шлифовальном и суперфинишном оборудовании, и ее профиль не содержал существенных отклонений от прямолинейности. Детали подшипников этой партии были изготовлены по классу точности 0 по ГОСТ-520-71\* и собраны с радиальным зазором по нормальному ряду /наим.-25 мкм, наиб.-35 мкм/.

Три последующие опытные партии роликоподшипников были укомплектованы внутренними кольцами новой конструкции, содержащими дорожку качения, профиль которой выполнен в виде степенной кривой с различными значениями показателя формы / $n$ / и величины выпуклости / $\delta$ /. Требуемый профиль был получен на стадии окончательной обработки роликовой дорожки методом многобрускового суперфиниширования. Подшипники этих партий соответствовали нулевому классу точности по ГОСТ 520-71\*.

Третьей партии опытных подшипников был присвоен индекс 423050П41, она состояла из подшипников, у которых дорожки качения внутренних колец имели профиль в виде параболы с показателем формы  $n=3.5-5.5$ . Подшипники были собраны с радиальным зазором, лежащим в пределах  $0.025 \text{ мм} \leq \delta_p \leq 0.030 \text{ мм}$ .

Четвертая опытная партия имела индекс 423050П42 и состояла из подшипников, имеющих параболический профиль дорожки качения

внутренних колец с показателем формы  $n=4-7$  и радиальный зазор  $\delta_p=0,030-0,035$  мм.

Подшипники пятой партии /индекс 423050П43/ были собраны с радиальными зазорами по нормальному ряду /наим.-0.025мм, наиб.-0.035мм/ и имели параболический профиль дорожек качения внутренних колец с показателем формы  $n=1.5-3$ .

Величина выуклости параболического профиля у подшипников последних трех экспериментальных партий находилась в пределах от 2 мкм до 15 мкм.

С целью уменьшения влияния случайных факторов подшипники всех опытных партий /кроме первой/ комплектовались роликами /9x9мм/, наружными кольцами и сепараторами из одних и тех же групп деталей, обработанных на одном и том же оборудовании по одинаковой технологии.

Рабочие поверхности дорожек качения наружных колец и роликов у всех испытанных подшипников имели прямолинейный профиль с примерно одинаковыми геометрическими характеристиками. Все подшипники снабжались пластмассовыми сепараторами и имели примерно равные отклонения геометрической формы в продольном сечении дорожек качения наружных и внутренних колец, а также роликов.

Контроль волнистости и отклонений от круглости рабочих поверхностей колец и роликов осуществляли на приборе "Талиронд", погрешности профиля дорожек качения и их шероховатость замерялись на приборе "Талисерф-4".

Форма профиля роликовых дорожек внутренних колец подшипников последних трех партий записывалась на бумагу и аппроксимировалась зависимостью  $y=Ax^n$  с помощью измерительной машины "КИМ-0001", снабженной программным устройством, микро-ЭВМ и записывающим прибором. Измерения обеспечивались с точностью до 0.001 мм.

Радиальный зазор в подшипниках определялся как средняя величина нескольких измерений суммарного смещения в плоскости, перпендикулярной оси подшипника. Такое смещение претерпевало наружное кольцо / внутреннее - неподвижное / при его вращении в различных угловых направлениях относительно неподвижного кольца и при различных угловых положениях комплекта тел качения относительно колец подшипника.

### **2.3 Методика проведения испытаний и обработки экспериментальных данных**

Испытания всех партий подшипников проводились на стандартном оборудовании типа ЦКБ-72, ВНИИП-542, обслуживание которого, а также монтаж и демонтаж подшипников осуществлялись в соответствии с действующей отраслевой методикой форсированных испытаний подшипников РДМ 37.006.006-80.

Посадка колец испытуемых подшипников на вал и в корпус производилась с учетом следующих требований:

- кольца при испытании не должны проворачиваться;
- посадочный фактический радиальный зазор не должен быть меньше некоторой допустимой величины, гарантирующей отсутствие заклинивания подшипников.

Испытания проводились при следующих режимах:

- радиальная нагрузка - 7.5 кН ;
- частота вращения внутреннего кольца - 5000 об/мин ;
- смазка - И-12А ;
- режим смазки - циркуляционный.

Критерием выхода из строя испытываемых подшипников являлось усталостное выкрашивание на поверхности одной или нескольких деталей. Подшипники, в процессе работы которых имело место нарушение смазывания или проворачивалось на валу внутреннее кольцо, с испытаний снимались и при обработке результатов не учитывались.

В ходе испытаний предстояло решить две задачи:

1. сравнить работоспособность каждой из испытываемых конструкций подшипников;
2. экспериментально оценить влияние на долговечность подшипника параметров параболического профиля его дорожки качения и величины радиального зазора.

Поскольку долговечность подшипников качения является величиной вероятностной, то для решения первой задачи использовали статистические оценки надежности, полагая при этом, что функция распределения вероятностей отказов испытываемых подшипников соответствует трехпараметрическому распределению Вейбулла:

$$1 - F(L) = e^{-\left(\frac{L - L_{\min}}{b}\right)^k},$$

где  $F(L)$  - вероятность усталостного разрушения подшипника при долговечности его работы, равной  $L$ ;

$L_{\min}$  - минимальное значение долговечности, при котором невозможно разрушение подшипника;

$b$  - параметр масштаба, характеризующий степень "растянутости" кривой распределения вдоль оси;

$k$  - параметр износа.

Из-за малого количества подшипников в опытных партиях, при обработке результатов испытаний не удалось применить стандартную методику, изложенную в РДМ 37.006.006-80, поэтому для определения

оценок параметров распределения использовали зависимости, полученные в Институте математики им. Стеклова Академии наук СССР. Эти оценки имеют вид:

$$L_{\min} = \frac{1}{N-1}(NL_{\phi} - \bar{L});$$

$$b = \frac{N}{N-1}(\bar{L} - L_{\phi}),$$

где  $\bar{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i$  - средняя долговечность подшипников в партии, час;

$N$  - общее число испытанных подшипников в партии;

$L_{\phi}$  - долговечность наименее стойкого подшипника в партии, час;

$L_i$  - долговечность  $i$ -го подшипника в партии, час.

Оценку параметра износа  $/K/$  в соответствии с рекомендациями [50], для всех испытанных партий подшипников принимали равной 1.12. По известным оценкам параметров распределения для каждой партии рассчитывали среднюю статистическую долговечность  $/L_{50}/$ , которую выдержали или превысили 50% подшипников данной партии, и гарантированную долговечность  $/L_{90}/$ , которую имеют или превысили 90% подшипников каждой партии:

$$L_{50} = L_{\min} + b(-\ln 0.5)^{\frac{1}{k}};$$

$$L_{90} = L_{\min} + b(-\ln 0.9)^{\frac{1}{k}}.$$

С целью оценки влияния на работоспособность роликоподшипников формы профиля их дорожек качения и радиального зазора в процессе испытаний последних трех партий реализовали точки ортогонального центрального композиционного плана второго порядка, позволяющего с достаточной точностью определять оптимальную область факторного пространства. При этом варьировали формой дорожки качения внутреннего кольца, так как, по признаку контактной усталости, в большинстве случаев оно оказывается наиболее слабым элементом подшипников общего назначения [53].

В качестве факторов, характеризующих параболическую форму профиля дорожки качения, использовали показатель формы  $n$  и величину выпуклости  $\delta$ , однозначно связанную с коэффициентом формы в уравнении профиля:

$$y = Ax^n,$$

где  $A = \frac{\delta}{\left(\frac{l}{2}\right)^n}$ ;  $l$  - длина роликовой дорожки.

Радиальный зазор в подшипнике в значительной степени влияет на его эксплуатационные характеристики и во многом определяет температурный режим и условия смазывания деталей подшипников. Поэтому при исследовании работоспособности подшипников с модифицированным контактом рабочих поверхностей, снижающим тепловыделения и улучшающим условия смазки, представляет интерес определение наиболее рационального диапазона величин радиальных зазоров, обеспечивающего наилучшие результаты при эксплуатации подшипников с оптимизированной формой дорожек качения. Таким образом, использование радиального зазора в качестве фактора, влияющего на долговечность подшипника, является вполне оправданным.

Каждый из трех факторов, в целях обеспечения минимального количества точек плана, варьировали на 5-ти уровнях, значения которых определяли на основе анализа литературных данных, расчетов, и предварительных опытов /табл.2.1/. Величину звездного плеча определяли по табличным данным [63]. В качестве уровней варьирования принимали не фиксированные значения факторов, а интервалы значений, при этом в табл.2.2 заносили средние арифметические значения интервалов уровней варьирования, которые использовали для расчетов при обработке данных. Поскольку в процессе испытаний несколько подшипников вышло из строя преждевременно, по причинам, не связанным с усталостным разрушением

их деталей, и данные этих подшипников при обработке результатов не учитывались, для некоторых точек плана эксперимента в качестве действительных значений параметра оптимизации принимались значения, полученные в ходе предварительных испытаний.

При построении плана эксперимента второго порядка учитывали принципы шагового эксперимента, и в связи с этим использовали центральный композиционный план, состоящий из трех блоков, включающих: точки полного факторного эксперимента, "звездные" точки и нулевые /центральные/ точки, что позволило сэкономить некоторое число опытов.

В качестве критерия оптимальности планирования использовали ортогональность плана. Это дало возможность оценивать коэффициенты уравнения регрессии независимо с минимальными дисперсиями, а незначимые коэффициенты отбрасывать без пересчета оставшихся значимых коэффициентов.

Таблица 2.2

**Уровни варьирования и кодовые обозначения факторов при испытании подшипников на долговечность**

Уровни	Нормированные значения уровней	Факторы в единицах измерения		
		n	$\delta$ (мкм)	$\delta_p$ (мкм)
Верхний	+1	5.5	12.5	34
Нижний	-1	2.3	3.5	27
Основной	0	3.9	8	30.5
Интервал варьирования	-	1.6	4.5	3.5
Верхний уровень "звездного" плеча	+1.215	5.8	13.5	34.7
Нижний уровень "звездного" плеча	-1.215	1.9	2.5	26.2
Кодовые обозначения		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$

Для исследования влияния варьируемых факторов на параметр оптимизации использовали квадратичную модель уравнения регрессии, которое в кодированной форме имеет следующий вид:

$$y_u = b_{u0} + b_{u1}Z_1 + b_{u2}Z_2 + b_{u3}Z_3 + b_{u12}Z_1Z_2 + b_{u23}Z_2Z_3 + b_{u11}Z_1^2 + b_{u22}Z_2^2 + b_{u33}Z_3^2,$$

где  $y_u$  - параметр оптимизации;  $b_{ui}$  - коэффициенты регрессии;  $Z_i$  - факторы модели в кодированном виде.

Полагая, что ошибки наблюдений распределяются по нормальному закону с нулевым средним и конечной дисперсией, входные переменные измеряются без ошибок и наблюдения независимы, для обработки экспериментальных данных применяли приемы регрессионного анализа, основанные на методе наименьших квадратов. Расчеты, проверку воспроизводимости экспериментов, значимости коэффициентов, адекватности математического описания и другие операции производили в соответствии с рекомендациями, изложенными в известной методике [63]. Результаты всех расчетов заносили в журнал планирования экспериментов /приложение 14/.

Для перехода от кодированных значений факторов в уравнении регрессии к их действительным значениям использовали уравнения преобразования, имеющие следующий вид:

$$Z_1 = \frac{n - 3.9}{1.6},$$
$$Z_2 = \frac{\delta - 8}{4.5},$$
$$Z_3 = \frac{\delta_p - 30.5}{3.5},$$

где  $n$ ,  $\delta$ ,  $\delta_p$  - действительные значения факторов соответственно показателя формы, величины выпуклости, радиального зазора.

Полученное уравнение регрессии использовали для построения и анализа зависимостей долговечности подшипников от конструктивных особенностей.

#### **2.4. Исследование влияния конструктивных особенностей роликовых подшипников на их долговечность**

Расчеты статистических характеристик каждой партии испытанных подшипников, результаты которых представлены в табл.2.3 , дали возможность произвести сравнительную оценку их работоспособности. Сравнивая по фактической долговечности, т. е. по долговечности первого, вышедшего из строя подшипника партии, видно, что наилучшие и примерно одинаковые результаты показали подшипники 3-й и 4-й опытных партий, имеющие параболическую форму дорожек качения внутренних колец. Долговечность наименее стойкого подшипника этих партий почти в три раза выше аналогичного показателя подшипников 1-й партии и более чем в три раза превышает его у подшипников 2-й и 5-й партий.

Если оценивать работоспособность по средней долговечности, то опять же наилучшие результаты показали подшипники 3-й партии, имеющие наиболее рациональный с точки зрения расчетов профиль дорожек качения внутренних колец и радиальный зазор. Их средняя долговечность на 10% выше средней долговечности подшипников 1-й партии, на 35% - подшипников 2-й партии, на 54% - подшипников 4-й партии и на 71% - подшипников 5-й опытной партии. Аналогичные результаты дало сравнение по средней статистической долговечности  $L_{50}$ , что свидетельствует о правомерности применения разработанной для данного случая методики расчета статистических характеристик

распределения долговечности и правильном подборе значений оценок параметров износа /K/.

Таблица 2.3

**Фактические и статистические характеристики долговечности испытанных роликоподшипников**

Характеристика партий	Фактические характеристики		Статистические характеристики		Параметры распределения Вейбулла		
	$L_{\phi}$ (час)	$\bar{L}$ (час)	$L_{90}$ (час)	$L_{50}$ (час)	$L_{\min}$ (час)	b (час)	K
	2	3	4	5	6	7	8
1 партия №66-42305AM $d_p \times l_p = 9 \times 11$ мм	145	1274	189	924	19.6	1254	1.12
2 партия №423050П2 $d_p \times l_p = 9 \times 9$ мм	123	922	159	676	40	822	1.12
3 партия №423050П41 $d_p \times l_p = 9 \times 9$ мм $n = 3.5 - 5.5$ $\delta_p = 0.025 - 0.030$	428	1416	454	1107	304.5	1111.5	1.12
4 партия №423050П42 $d_p \times l_p = 9 \times 9$ мм $n = 4 - 7$ $\delta_p = 0.030 - 0.035$	417	658	420	584	377	281	1.12
5 партия №423050П43 $d_p \times l_p = 9 \times 9$ мм $n = 1.7 - 3$ $\delta_p = 0.025 - 0.035$	134	416	137	329	87	330	1.12

Наиболее объективную оценку работоспособности испытанных подшипников позволяет дать сравнение по 90% долговечности  $/L_{90}/$ , т.е. по долговечности, которую имеют или превысили 90% подшипников партии. Наилучшее значение этого показателя имеют подшипники 3-й партии, у них он в 2.4 раза выше, чем у подшипников 1-й партии, и в 2.8 раза - чем у подшипников 2-й партии.

Таким образом, как и следовало ожидать, наилучшую долговечность по всем расчетным и фактическим характеристикам показали подшипники 3-й экспериментальной партии, собранные с рациональной величиной радиального зазора и имеющие наиболее оптимальные параметры параболического профиля дорожки качения, полученные при ее доводке методом многобрускового суперфиниширования.

Стандартные подшипники 1-й партии оказались менее работоспособны, несмотря на имеющиеся конструктивные особенности, направленные на повышение их эксплуатационных характеристик. Увеличение длины образующей дорожек качения и роликов, хотя и способствует некоторому увеличению долговечности подшипников, но это повышение незначительно и тем меньше, чем больше угол перекоса колец.

Полученные результаты показали, что обеспечение повышенной точности прямолинейного профиля не всегда приводит к ощутимому увеличению работоспособности подшипников даже в условиях стендовых испытаний, выгодно отличающихся от реальных условий эксплуатации.

Несомненно, что конструкции подшипников первых двух испытанных партий будут весьма эффективны в узлах повышенной точности и жесткости, с минимально допустимыми перекосами осей. В подобных условиях наиболее полно реализуются все преимущества, которыми они обладают. Использование же таких подшипников в узлах массового применения, по всей вероятности, не даст весомого положительного эффекта.

Самые низкие результаты оказались у подшипников 5-й партии с профилем дорожек качения внутренних колец, имеющим малые значения показателя формы. У большинства подшипников этой партии профиль по форме приближался к дугообразному с различными величинами выпуклости. Подобная форма профиля обеспечивает неравномерное

распределение напряжений вдоль площадки контакта, высокий уровень удельных давлений, достигающих своих максимальных величин в центре области соприкосновения. Такие условия контактирования способствуют возникновению значительных энергетических потерь на контакте и интенсификации усталостных явлений.

Таким образом, экспериментально установлено, что параметры геометрической формы профиля дорожек качения оказывают существенное влияние на работоспособность подшипников. Оценить механизм этого влияния позволяет адекватное уравнение регрессии, полученное в результате математической обработки экспериментальных данных. В действительной форме оно имеет следующий вид:

$$L = -6102.4 + 2250.2n + 311.9\delta + 159.7\delta_p + \\ + 34.3n\delta - 32.8n\delta_p - 13.2\delta\delta_p - 174.7n^2.$$

Как видно из уравнения, исключительно сильное влияние на долговечность оказывает показатель формы  $n$ . Несколько меньшее влияние, но тоже сильное, имеет величина выпуклости  $\delta$  и радиальный зазор в подшипнике  $\delta_p$ . Наличие в уравнении регрессии смешанных членов говорит о важной роли в обеспечении высокой работоспособности подшипника комбинаций значений параметров профиля и радиального зазора. Присутствие квадратичного члена обеспечивает параболический характер зависимости долговечности от показателя формы. В процессе построения математической модели, при проверке значимости, коэффициенты при квадратах  $\delta$  и  $\delta_p$  оказались незначимыми и были отброшены. В результате этого некоторые графики зависимостей носят линейный характер.

Результаты исследования влияния на работоспособность подшипников показателя формы и величины выпуклости, в полной мере

характеризующие форму профиля дорожки качения, при различных значениях радиальных зазоров показаны на рис.2.13, 2.14.

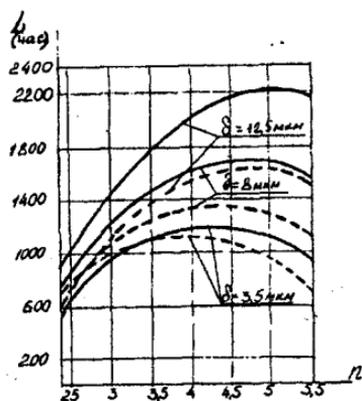


Рис. 2.13. Зависимость работоспособности рэликоподшипника от значения показателя формы  $n$  и величины выуклости  $\delta$  дорожки качения при радиальных зазорах:  $\delta_{ср} = 27 \text{ мкм}$ ,  $\delta_r = 30.5 \text{ мкм}$ .

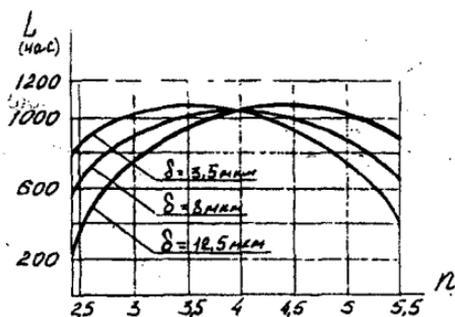


Рис. 2.14. Зависимость работоспособности рэликоподшипника от значения формы  $n$  и величины выуклости  $\delta$  дорожки качения при радиальном зазоре  $\delta_{ср} = 34 \text{ мкм}$ .

Из рисунков видно, что с увеличением показателя формы долговечность подшипников сначала резко увеличивается, потом начинает снижаться. Оптимальная область значений  $p$  лежит в пределах от 3.5 до 5. Когда показатель формы находится в указанных пределах, долговечность подшипников имеет максимальное значение на всех уровнях факторов. Но при этом она не одинакова и зависит от значения величины выпуклости и радиального зазора. При различных величинах  $\delta$  и  $\delta_r$  максимум долговечности приходится на разные значения показателя формы, лежащие в указанном интервале. Уменьшение величины выпуклости приводит к резкому снижению долговечности, и ее максимум смещается к нижней границе оптимального интервала показателя формы.

Это происходит потому, что малая величина выпуклости не соответствует радиальной нагрузке, что приводит к выходу пятна контакта на кромку дорожки качения и возникновению кромочного эффекта, заключающегося в резком возрастании удельных давлений в зонах, прилегающих к краям, а в случае перекоса колец - к одному из краев роликовой дорожки. При малых величинах выпуклости и показателя формы профиль дорожки качения приближается к дуге окружности. С увеличением показателя формы до максимальных значений профиль роликовой дорожки становится близким к прямолинейному, но имеет крутые округления по краям. В том и другом случае, вследствие кромочных явлений, наблюдается неравномерное распределение напряжений вдоль площадки контакта и, как видно из рис.2.12, 2.13, это приводит к одинаковому снижению работоспособности контакта.

Увеличение выпуклости роликовой дорожки до средних значений  $\delta \approx 8$  мкм/ способствует улучшению условий контактирования, при этом пятно контакта выходит на кромку дорожки качения при более высоких нагрузках, снижается уровень максимальных контактных напряжений

с более равномерным распределением их вдоль области контакта, что положительно сказывается на долговечности подшипников.

При значениях выпуклости, близких к оптимальным  $/\delta \approx 12,5 \text{ мкм}/$ , и рациональных величинах показателя формы  $/n = 3.5 - 5/$  площадка контакта не выходит на кромку дорожки качения при рабочих нагрузках, отсутствуют краевые явления, не нарушаются условия смазывания рабочих поверхностей и наблюдается максимально возможная долговечность.

Малые значения показателя формы  $/n \leq 3/$ , даже при оптимальных величинах выпуклости и радиального зазора, как показали испытания, не обеспечивают увеличения работоспособности.

Существенное влияние на долговечность подшипников с близкими к оптимальным параметрами параболического профиля дорожек качения оказывает величина радиального зазора. Наиболее благоприятными для параболического профиля оказались радиальные зазоры, близкие к минимальным  $/\delta_r \approx 27 \text{ мкм}/$  из нормального ряда.

С уменьшением величины выпуклости роликовой дорожки влияние на долговечность подшипников радиального зазора заметно ослабевает. При низких значениях выпуклости  $/\delta \approx 3.5 \text{ мкм}/$  во всем диапазоне допустимых радиальных зазоров долговечность подшипников почти одинакова при всех значениях показателя формы. Максимальные радиальные зазоры  $/\delta_r \approx 34 \text{ мкм}/$  способствуют уменьшению работоспособности подшипников даже с оптимальными параметрами профиля дорожек качения. При больших радиальных зазорах долговечность практически не зависит от формы профиля роликовых дорожек. В этом случае, в процессе работы подшипников возникают повышенные вибрации, снижается точность вращения, контактные поверхности деталей испытывают дополнительные ударные нагрузки, приводящие к преждевременному выходу подшипников из строя.

На рис.2.15-2.17 представлены графики зависимостей долговечности от коэффициента формы  $A$  и радиального зазора в оптимальном диапазоне значений показателя формы.

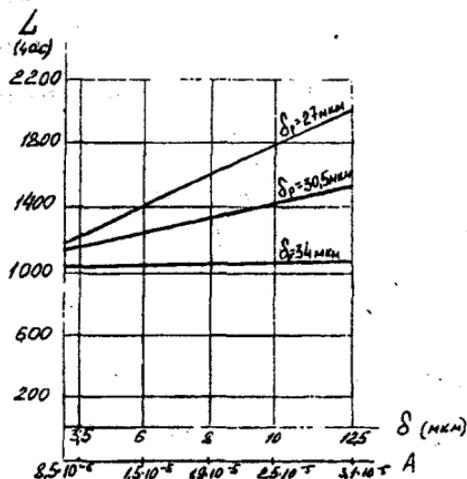


Рис.2.15. Зависимость работоспособности роликоподшипника от величины выпуклости ( $\delta$ ) роликовой дорожки, коэффициента формы ( $A$ ) и значения радиального зазора ( $\delta_r$ ) при показателе формы  $n=4$

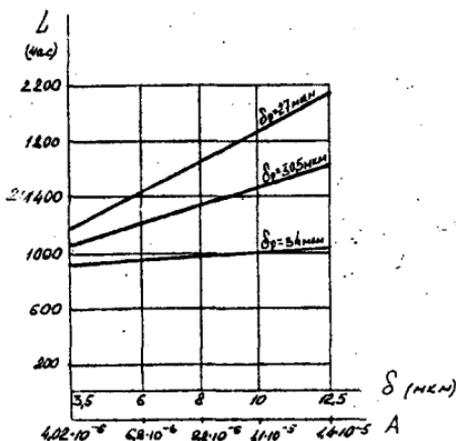


Рис.2.16. Зависимость работоспособности роликоподшипника от величины выпуклости ( $\delta$ ) роликовой дорожки, коэффициента формы ( $A$ ) и значения радиального зазора ( $\delta_r$ ) при показателе формы  $n=4,5$ .

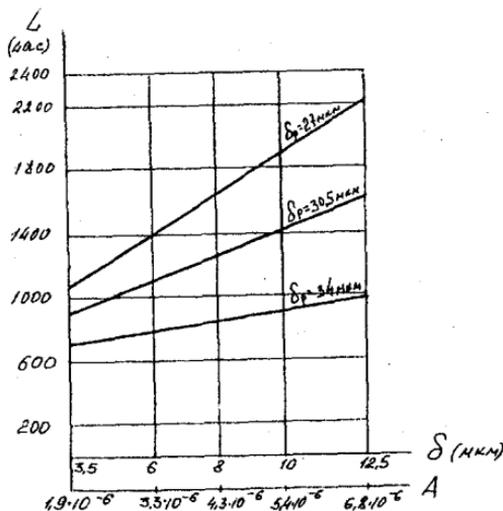


Рис. 2.17. Зависимость работоспособности роликоподшипника от величины выпуклости ( $\delta$ ) роликовой дорожки, коэффициента формы ( $A$ ) и значения радиального зазора ( $\delta_r$ ) при показателе формы  $n=5$

При малых величинах коэффициента формы, соответствующих минимальной выпуклости дорожки качения, работоспособность подшипников практически не зависит от показателя формы и величины радиального зазора. Она минимальна на всех уровнях факторов. С увеличением коэффициента формы долговечность увеличивается тем быстрее, чем выше показатель формы и меньше радиальный зазор. Поскольку каждому значению величины выпуклости соответствует определенное значение коэффициента формы, его влияние на долговечность подшипника аналогично влиянию на нее величины выпуклости, которое рассмотрено выше.

Полученная математическая модель позволяет определить оптимальную область значений показателя формы, которая лежит в пределах от 3.5 до 5.5. Анализ влияния на работоспособность подшипников радиального зазора и величины выпуклости дорожки

качения показал, что оптимальные значения этих факторов лежат либо за пределами факторного пространства, либо на границе области определения факторов. Так как в рамках данного эксперимента не удалось достигнуть оптимальной точки факторного пространства, а удалось лишь приблизиться к ней, то в качестве значений, близких к оптимальным, примем те значения факторов, при которых получены наилучшие результаты. Для радиального зазора и величины выпуклости это будут граничные значения их области определения  $\delta \approx 12.5 \text{ мкм}$ ,  $\delta_p \approx 27 \text{ мкм}$ , а для показателя формы - значения, лежащие внутри интервала варьирования  $n \approx 5$ .

Таким образом, установлено, что формирование на операции многобрускового суперфиниширования с локализацией зоны резания рациональной формы профиля позволяет более чем в два раза повысить долговечность роликоподшипников по сравнению с подшипниками, имеющими прямолинейные образующие роликовых дорожек и роликов. Рациональной является форма профиля дорожки качения в виде параболы четвертой - пятой степени с величиной выпуклости 11-12 мкм при радиальном зазоре в подшипнике 25 - 30 мкм.

### **3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МНОГОБРУСКОВОГО СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ**

#### **3.1. Технологические возможности многобрусковой абразивной обработки**

На основе выполненных исследований можно сформулировать основные принципы проектирования высокоэффективных технологий брусковой обработки рабочих поверхностей прецизионных деталей.

1. Многобрусковая схема обработки с расположением абразивных брусков в единой инструментальной головке.

2. Рациональная кинематика перемещения инструментальной головки, обеспечивающая требуемый характер взаимодействия брусков с обрабатываемой поверхностью и благоприятные условия для отвода из зоны резания стружки и шлама.

3. Подача брусков на обрабатываемую поверхность через жесткие кинематические звенья, обеспечивающие силовое и кинематическое замыкание брусков друг с другом и с обрабатываемой поверхностью заготовки.

Соблюдение указанных принципов при создании новых технологий брусковой доводки обеспечивает по сравнению с традиционными способами обработки следующие преимущества:

1. Повышенную производительность обработки, так как в работе одновременно участвуют несколько абразивных брусков и их режущая способность, в силу рациональных условий контакта с обрабатываемой поверхностью, не определяется временем обработки. В зависимости от принятой кинематики перемещения инструментальной головки, можно обеспечить постоянный, прерывистый или периодический контакт бруска с изделием и тем самым создать наиболее благоприятные условия резания при обработке конкретных деталей.

2. Возможность удаления дефектных слоев металла, оставшихся после предшествующей обработки.

3. Возможность эффективного профилирования обрабатываемой поверхности, т.е. придание ее профилю оптимальной геометрической формы, позволяющей значительно повысить долговечность и надежность эксплуатации изделий.

4. Повышенную исправляющую способность, заключающуюся не только в возможности снижения волнистости обрабатываемой поверхности, но и в эффективном уменьшении отклонений от круглости.

5. Получение заданной шероховатости обрабатываемой поверхности, независимо от исходной шероховатости поверхности заготовки.

6. Повышенную стабильность получения точностных и качественных показателей.

7. Осуществление операции доводки в один технологический переход, когда после обработки брусками не требуется дополнительной доработки абразивной или алмазной шкуркой.

8. Повышенный уровень универсальности и технологической гибкости, заключающийся в возможности обработки одной и той же инструментальной головкой различных по форме и размерам поверхностей.

9. Повышенную автоматизируемость процесса доводки, обусловленную простотой наладки и переналадки оборудования, отсутствием необходимости частой его подналадки в процессе обработки.

В полной мере перечисленным условиям соответствуют разработанные и исследованные способы многобрусковой обработки рабочих поверхностей деталей подшипников качения осциллирующим или вращающимся инструментом (рис.3.1).

Во всех случаях обработка осуществляется абразивными брусками 1, установленными в единой инструментальной головке 2, расположенными вокруг вращающейся обрабатываемой поверхности заготовки 3 с равным или переменным угловым шагом и прижатыми к ней с постоянной силой.

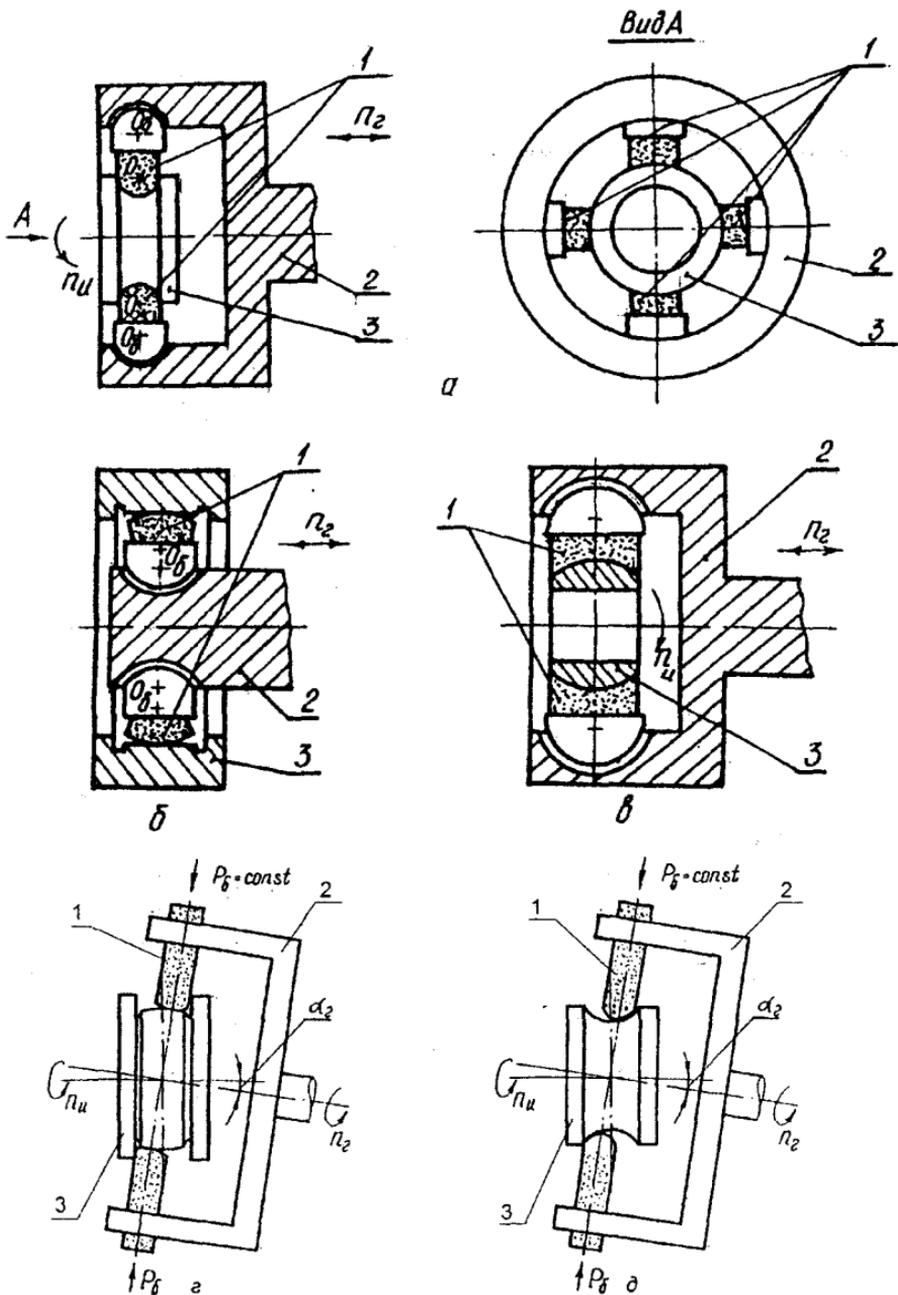


Рис. 3.1. Схемы многобрусковой доводки рабочих поверхностей колец подшипников качения

На рис. 3.1,а,б,в представлены схемы обработки рабочих поверхностей колец шариковых (рис.3.1,а), роликовых (рис.3.1,б) и шарнирных (рис.3.1,в) подшипников инструментальной головкой, совершающей прямолинейное осциллирующее движение в направлении оси вращения заготовки. При этом бруски качаются на собственных осях, скользя по обрабатываемой поверхности.

При обработке желобов колец шарикоподшипников центры качания брусков не совпадают с центром кривизны обрабатываемого профиля, что обеспечивает прерывистый контакт бруска с изделием и повышенную режущую способность инструмента. Это позволяет использовать для обработки мелкозернистые абразивные бруски, дающие возможность формировать требуемые параметры шероховатости и точности обрабатываемой поверхности в один технологический переход. Кроме того, упрощается наладка технологического оборудования, так как в процессе обработки не требуется совмещения центра качания брусков с центром кривизны профиля, а достаточно обеспечить совпадение плоскости симметрии обрабатываемого профиля с плоскостью симметрии абразивных брусков.

Многобрусовая обработка желобов колец шарикоподшипников в течение 8 секунд брусками зернистостью М10 обеспечивает следующие показатели обрабатываемой поверхности:

- шероховатость -  $R = 0,08-0,05$  мкм;
- волнистость -  $0,02-0,07$  мкм;
- отклонение от круглости -  $0,2-0,7$  мкм;
- гранность -  $0,05-0,1$  мкм.

При многобрусковой доводке рабочих поверхностей колец роликовых подшипников (рис.3.1,б) обеспечивается, так называемый, периодический контакт брусков с изделием, когда они в процессе цикла обработки, не отрываясь от обрабатываемой поверхности, перекатываются по ней со скольжением. Задавая соответствующие законы движения инструментальной головки или изменения давления брусков на

обрабатываемую поверхность в пределах рабочего цикла, можно эффективно профилировать поверхность обработки, придавая ей прямолинейный, дуговой или сложный профили.

Как показали исследования авторов, перемещая инструментальную головку в соответствии с законом косинуса и обеспечивая постоянное давление брусков, можно формировать выпуклый профиль образующей переменной кривизны. Изменение режимов обработки обеспечивает формирование профилей различной геометрической формы. При многобрусковой обработке роликовых дорожек осциллирующим инструментом в течение 6 секунд брусками зернистостью M14 обеспечивается снижение следующих показателей обработки по сравнению с исходными:

- волнистость - в 6 раз;
- гранность - в 2 раза;
- отклонение от круглости - в 3 раза.

При этом обеспечивается выпуклость обрабатываемого профиля в пределах 6 - 13 мкм и шероховатость поверхности обработки  $R = 0,10 - 0,16$  мкм.

Как видно из рис.3.1, многобрусковая обработка с прямолинейной осевой осцилляцией инструмента имеет повышенный уровень универсальности и автоматизируемости. Для перехода от обработки одних деталей к обработке других достаточно заменить инструментальную головку и выполнить простейшие приемы по проверке точности наладки оборудования. Для автоматизации этого процесса не требуется применение сложных механизмов, а для обслуживания оборудования могут быть использованы операторы и наладчики низкой квалификации.

На рис.3.1з,д представлены схемы многобрусковой обработки рабочих поверхностей колец подшипников вращающейся инструментальной головкой 2, ось вращения которой пересекается с осью вращения заготовки 3 под некоторым углом в центре симметрии обрабатываемого кольца. При этом бруски, не отрываясь от обрабатываемой поверхности,

скользят по ней, периодически контактируя различными участками своей режущей поверхности. Такой контакт бруска с изделием, как отмечалось ранее, позволяет осуществлять рациональное профилирование обрабатываемой поверхности. За счет улучшенных условий очистки режущей поверхности бруска от продуктов резания, данный метод позволяет повысить интенсивность съема припуска и обеспечить высокий уровень качества обработки (приложение 11-13).

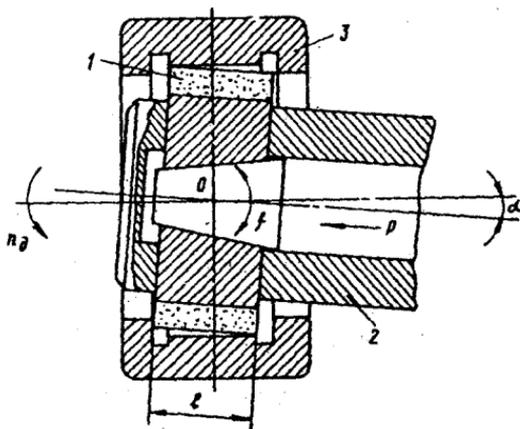
Одной из разновидностей многобрусковой обработки является доводка качающимися брусками (рис.3.2), когда инструментальная головка 2 совершает качательное движение относительно оси вращения заготовки 3 с центром качания, совпадающим с центром симметрии обрабатываемой заготовки.

Обработка поверхностей, ограниченных одним или двумя буртами, становится возможной потому, что при предлагаемом способе ширина брусков и угол поворота головки устанавливаются в зависимости от размеров обрабатываемой поверхности и расстояния ближайшего бурта до центра ее профиля. Выпуклый профиль обрабатываемой поверхности формируется за счет того, что в каждом крайнем угловом положении головки относительно детали давление брусков на концевые участки профиля детали возрастает и с этих участков снимается повышенный припуск по сравнению со средним участком профиля. Так как инструментальная головка осуществляет лишь простое движение - поворот относительно точки пересечения осей головки и заготовки, то все абразивные бруски всегда находятся в одновременном контакте с обрабатываемой поверхностью, что существенно повышает эффективность обработки.

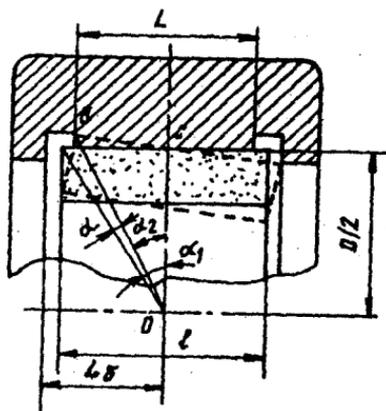
На рис.3.2,а изображена схема осуществления способа, а на рис.3.2,б - схема для определения угла поворота и длины брусков.

Абразивные бруски 1 жестко связаны между собой инструментальной головкой 2 и под действием ее механизма подачи прижимаются к обрабатываемой поверхности заготовки 3 - дорожки качения

наружного кольца роликоподшипника. Заготовка 3 вращается вокруг своей оси с частотой  $n_0$ , инструментальная головка 2 периодически с частотой  $f$  поворачивается вокруг точки симметрии обрабатываемой поверхности (точка 0) в плоскости расположения брусьев 1 на угол  $\pm\alpha$ .



а



б

Рис. 3.2. Схемы многобрусковой доводки рабочих поверхностей колец подшипников качающейся инструментальной головкой

В момент, когда угол  $\alpha$  пересечения осей головки 2 и заготовки 3 равен нулю, под действием механизма подачи бруски 1 перемещаются в направлении обрабатываемой поверхности и прижимаются к ней с заданной силой. В последующем в процессе поворота головки 2 относительно оси заготовки 3 на угол  $\alpha$  бруски 1 также поворачиваются относительно точки 0 на тот же угол, вследствие чего их давление на концевые участки профиля детали возрастает. С этих участков профиля заготовки снимается дополнительный припуск. При возвращении головки 2 в исходное положение ( $\alpha=0$ ) бруски 1 под действием механизма подачи вновь прижимаются к обрабатываемой поверхности с заданной силой, а при дальнейшем повороте головки вокруг точки 0 в противоположную сторону на угол  $(-\alpha)$  бруски также поворачиваются относительно точки 0 на этот угол и врезаются в концевые участки профиля заготовки своими противоположными концами с повышенным давлением. Опять с этих участков профиля заготовки снимается повышенный припуск. Затем головка 2 вновь возвращается в исходное положение ( $\alpha=0$ ), и бруски 1 давят на поверхность детали с заданной силой, снимая с центральной части ее профиля умеренный припуск.

Указанный цикл перемещения головки многократно повторяется, в результате чего постепенно формируется заданный выпуклый профиль детали, а бруски очищаются от стружки и шлама и сохраняют свои высокие режущие свойства.

Если ось поворота головки 2 не совпадает с осью, пересекающейся в точке 0 с осью вращения заготовки 3, то первоначально с обрабатываемой поверхностью контактирует только тот брусок, в сторону которого произошло указанное смещение. Но через небольшое время этот брусок изнашивается и в контакт с деталью вступает и второй брусок и оказывает на обрабатываемую поверхность такое же действие, как и первый брусок. Таким образом, предлагаемый способ обеспечивает саморегулирование

процесса обработки и, следовательно, его повышенную эффективность, т.е. повышенную производительность обработки и повышенную исправляющую способность, снижение волнистости и гранности.

На рис.3.2,б сплошной линией показано положение бруска в исходном положении ( $\alpha=0$ ), а пунктиром - крайнее положение бруска. Очевидно, что для того, чтобы при наклоне головки бруски не касались буртов заготовки, необходимо, чтобы максимально возможный угол поворота бруска, а следовательно, головки не превышал величину

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2.$$

Из рис.3.2

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{l}{D},$$

где  $l$  - ширина брусков;

$D$  - диаметр обрабатываемой поверхности.

В свою очередь,

$$\alpha_2 = \operatorname{arcsin} \frac{L}{2OB},$$

где  $L$  - длина обрабатываемой поверхности.

Из рис.3.2

$$\sin \alpha_2 = \left( \frac{L}{D} \sqrt{\frac{1+l^2}{D^2}} \right).$$

Так как

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{L}{D \sqrt{1 + \frac{l^2 - L^2}{D^2}}},$$

то при  $(l^2 - L^2)/D^2 \leq 0.1$ , с погрешностью менее 5%

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{L}{D},$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left[ \frac{D(1-L)}{D^2 + l \cdot L} \right].$$

Из данного выражения несложно определить, что максимальный угол наклона головки обеспечивается при длине брусков

$$l=0.5L+L_k.$$

где  $L_k$  - расстояние плоскости симметрии профиля до бурта.

Таким образом, при указанных  $l$  и  $\alpha$  возможна обработка поверхностей, ограниченных буртами.

Как было показано в данной работе, многобрусковая технология суперфиниширования весьма эффективна при окончательной отделочной обработке дорожек качения роликоподшипников. Однако наши исследования показали, что область практического применения этой технологии значительно шире. В отличие от традиционной технологии, многобрусковое суперфиниширование - настолько универсальный технологический процесс, что успешно может применяться при обработке не только наружных, но и внутренних поверхностей, не только роликовых, но и шариковых, и сферических колец подшипников, не только однорядных, но и двухрядных колец, а также колец комбинированных подшипников. Это намного упрощает как производство, так и эксплуатацию технологического оборудования.

Приведем несколько примеров. Так, на научно-производственном предприятии нестандартных изделий машиностроения доктором технических наук А.А. Игнатьевым и кандидатом технических наук М.В. Виноградовым выполнены исследования эффективности многобрускового суперфиниширования конических колец роликоподшипников. Образцы изготавливались шлифованием из внутренних колец роликоподшипников 42212. Обрабатываемой поверхности образцов придавалась конусность с различными углами: 1, 4, 7 и 11 градусов.

Обработка осуществлялась на станке КХВ-80, четырьмя абразивными брусками 24М14СМ1К5. Оперативное время обработки для колец с углами 1 и 4 градуса составляло 6...8 секунд, для колец с углом конуса 7 и 11 градусов - 12...16 секунд. Сила прижима брусков к образцам составляла 70 Н.

Образцы перед суперфинишированием имели некруглость до 1,2 мкм, волнистость - до 0,4 мкм, шероховатость  $R_a = 0,5...0,7$  мкм. Все образцы перед обработкой имели корсетность до 11 мкм, что характерно для операций шлифования. Как известно, корсетность плохо исправляется на операциях суперфиниширования и оказывает существенное отрицательное влияние на работоспособность роликовых подшипников.

После многобрускового суперфиниширования угол конуса слегка изменялся (в пределах до 20 минут), что вполне допустимо. Существенно снижались непрямолинейность образующей (с 8-11 мкм до 1-3 мкм), волнистость обработанной поверхности (с 0,3-0,4 мкм до 0,04-0,05 мкм), некруглость (с 1,1-1,2 мкм до 0,5 - 0,6 мкм). В 5-6 раз снижалась шероховатость поверхности (с 0,5 - 0,7 мкм до 0,08 - 0,12 мкм).

Основные результаты экспериментов представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Показатели многобрускового суперфиниширования конических колец подшипников**

Наименование показателей	Конус			
	1 градус	4 градуса	7 градусов	11 градусов
Изменение угла конуса	+12''	-12''	+ 10''	-20 ''
Непрямолинейность образующей:				
• до	-8 мкм	-10 мкм	-11 мкм	-10 мкм
• после	+2 мкм	+ 3 мкм	+1 мкм	+3 мкм

Шероховатость поверхности $R_a$				
• до	0,5 мкм	0,7 мкм	0,6 мкм	0,5 мкм
• после	0,08 мкм	0,10 мкм	0,10 мкм	0,12 мкм
Волнистость:				
• до	0,3 мкм	0,4 мкм	0,3 мкм	0,3 мкм
• после	0,05 мкм	0,04 мкм	0,05 мкм	0,05 мкм
Некруглость:				
• до	1,0 мкм	1,2 мкм	1,1 мкм	1,0 мкм
• после	0,55 мкм	0,60 мкм	0,55 мкм	0,55 мкм

Как видно из табл. 3.1, показатели качества конических колец подшипников после операции многобрускового суперфиниширования даже при таком малом времени обработки существенно улучшаются.

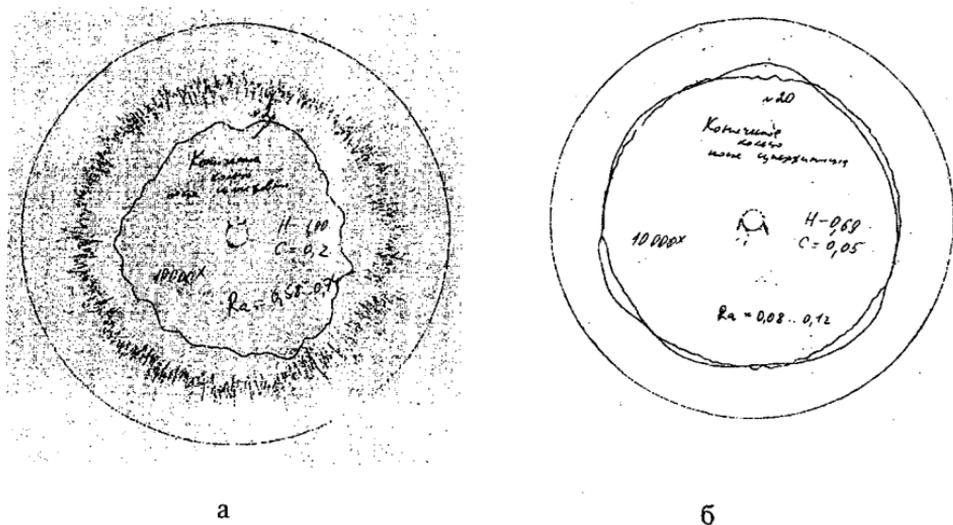
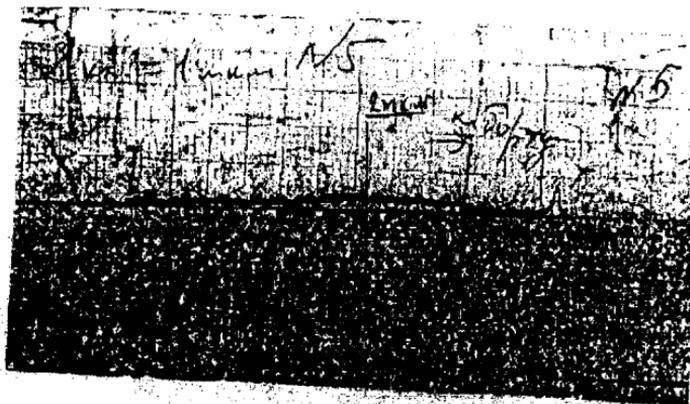


Рис. 3.3. Круглограммы поверхности заготовки до (а) и после суперфиниширования (б)

На рис. 3.3 приведены профилограммы одного из колец конических роликоподшипников с углом конуса 4 градуса до и после обработки. Как видно, некруглость поверхности кольца снизилась в 1,5 раза, волнистость - в 4 раза, шероховатость - в 7 раз. На рис. 3.4 приведена профилограмма

рабочей поверхности этого кольца после суперфиниширования. Профилограмма наглядно показывает образование на поверхности кольца выпуклой формы. Это характерно и особенно ценно для конических колец, так как другими способами исправить корсетность заготовок и получить выпуклость весьма затруднительно, а без этого невозможно обеспечить высокую работоспособность подшипников.



*Рис. 3.4. Профилограмма обработанной поверхности*

В научно-исследовательской лаборатории научно-производственного предприятия нестандартных изделий машиностроения А.А. Игнатьевым и М.В. Виноградовым также проводились исследования возможности многобрусковой обработки двухрядных колец подшипников.

В качестве оборудования также использовался станок КХВ-80, в качестве заготовок - наружные кольца двухрядных шарикоподшипников 256907. Обработка колец осуществлялась четырьмя брусками 24М7СМ1К5 одновременно двух дорожек. Частота вращения шпинделя изделия составляла 2500 об/мин., частота вращения инструментальной головки - 70 об/мин. Усилие прижима брусков к обрабатываемой поверхности составляло 60...80 Н, время обработки - 20 сек.

**Показатели многобрусковой обработки двухрядных колец подшипников 257907**

Наименование показателей	После шлифования, мкм	После суперфиниширования, мкм
Шероховатость $R_a$	0,58...0,63	0,16
Волнистость	0,25...0,30	0,03...0,05
Некруглость	2...4	1,5...2,5
Отклонение профиля	5...8	1,5...6,0

На рис. 3.5 представлены профилограммы колец подшипников до и после обработки. Из рисунков видно, что качество поверхности в процессе суперфиниширования повышается. Особенно жесткие требования при обработке дорожек качения двухрядных подшипников предъявляются к разноразмерности дорожек по дну желоба.

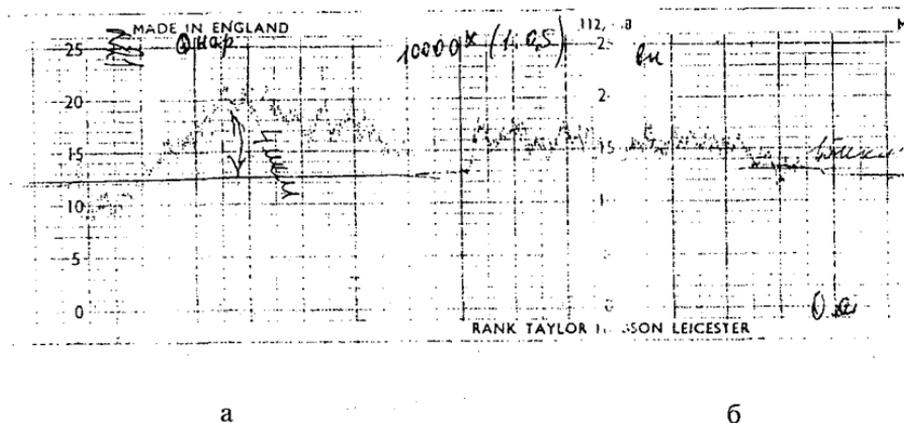


Рис. 3.5. Профилограммы поверхности заготовки до (а) и после многобрускового суперфиниширования (б)

При обычном суперфинишировании разноразмерность дорожек значительно возрастает, что вызывает повышенный брак колец. Так как при использовании предложенной технологии обработка обеих дорожек осуществляется одновременно двумя парами брусков, закрепленных с возможностью самоустановки, то разноразмерность дорожек не возрастает, что открывает широкие возможности для использования данной технологии при суперфинишировании колец многорядных подшипников, а также и других подобных деталей, например шариковых винтовых поверхностей.

Таким образом, область практического использования предложенной технологии охватывает наружные и внутренние кольца подшипников различных типов. Но, на наш взгляд, область ее применения даже выходит за рамки подшипникового производства. Например, многобрусковое суперфиниширование может применяться в станкостроении и в автомобильной промышленности при обработке винтовых поверхностей, коротких осей, шарниров и других подобных деталей, а также шеек коленчатых валов.

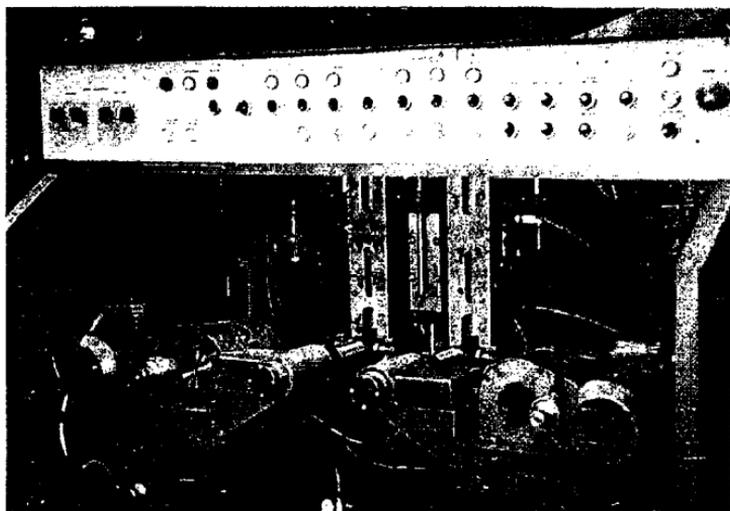
### **3.2. Промышленная реализация результатов выполненных исследований**

Результаты выполненных исследований нашли применение в области проектирования и производства суперфинишного оборудования, а также в сфере изготовления и эксплуатации подшипников качения.

На основе представленных в работе исследований спроектировано, изготовлено и внедрено в производство универсальное технологическое оборудование для многобрусковой обработки рабочих поверхностей колец подшипников, не имеющее отечественных и мировых аналогов.

Двухпозиционные микрофинишные автоматы серии МФ (рис.3.6) предназначены для обработки дорожек качения колец шариковых и роликовых подшипников в широком диапазоне типоразмеров. В их конструкции заложена схема многобрусковой обработки, представленная на рис.3.1,а,б,в. Использование только одного такого автомата на ОАО СПЗ для обработки желобов колец шарикоподшипников позволило повысить производительность доводки в 5 раз по сравнению с производительностью действующего оборудования и высвободить из области производства 6 квалифицированных станочников. При этом годовая экономия средств составила 71577 рублей в ценах до 1991 года .

Внедрение данного автомата на операциях суперфиниширования роликовых дорожек колец роликоподшипников обеспечило повышение производительности обработки в 2,5 раза и высвобождение 4 работников. Годовой экономический эффект от внедрения автомата в производство составил 49447 рублей в ценах до 1991 года .



*Рис. 3.6. Рабочая зона микрофинишного автомата мод. МФ-1*

На рис.3.7 представлен общий вид однопозиционного многобрускового доводочного автомата модели МДА-2500, реализующего

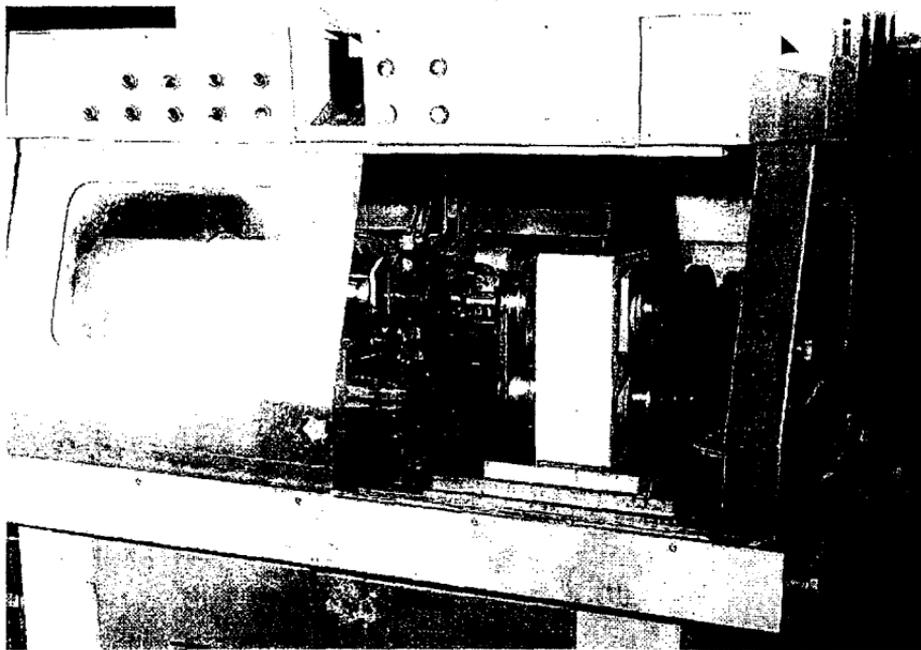
в своей конструкции схему доводки вращающейся инструментальной головкой (см. рис.3.1,г,д). Отсутствие в конструкции станка традиционных механизмов осцилляции позволило в значительной степени снизить его виброактивность и шумность, что, с одной стороны, обеспечило повышенную стабильность получения точностных и качественных показателей обработки, с другой, - улучшило условия труда работников. Экономическая эффективность от внедрения автомата на ОАО СПЗ при доводке дорожек качения колец роликоподшипников составила 21000000 руб. в год. Она получена, в основном, за счет снижения машинного времени обработки.



*Рис. 3.7. Общий вид многобрускового доводочного автомата мод. МДА-2500*

Автомат для косоугольного хонингования модели КХВ-80 (рис.3.8) представляет собой модернизированный вариант станка МДА-2500. Некоторое усовершенствование узлов и агрегатов автомата КХВ-80 в значительной степени повысило его надежность и позволило освободиться

от некоторых конструктивных недостатков его предшественника. Экономический эффект от внедрения на ОАО СПЗ составил 18000000 руб. в год.



*Рис 3.8. Рабочая зона многобрускового автомата мод. КХВ-80*

В отличие от ранее рассмотренных моделей, имеющих горизонтальное расположение осей шпинделей изделия и инструментальной головки, в конструкции автомата ВДА-30В (рис.3.9) заложена вертикальная схема. Кроме того, в этом станке реализован способ многобрусковой обработки качающейся инструментальной головкой (см. рис. 3.2,а,б).

Автомат предназначен для окончательной обработки дорожек качения внутренних колец шариковых и роликовых подшипников 4-6 класса точности. Техническая характеристика автомата представлена в табл. 3.3.

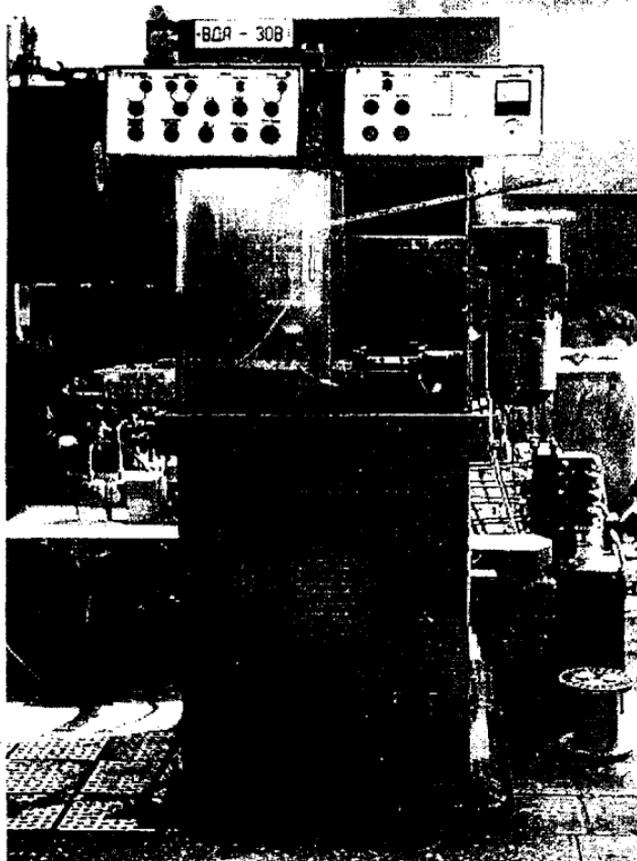


Рис 3.9. Общий вид вертикально-доводочного автомата ВДА-30В

Таблица 3.3

**Техническая характеристика автомата мод. ВДА-30В**

Диапазон размеров обрабатываемых колец, мм	
- диаметр наружного кольца	30-100
- высота кольца	10-25
Количество позиций обработки, шт.	1
Производительность, шт./час	250-350
Частота вращения шпинделя изделия, об/мин	4000

Частота качения инструментальной головки, в мин	50-100
Угол качения инструментальной головки, °	1
Усилие прижима абразивного бруска к обрабатываемой поверхности, кгс	5
Характеристика абразивных брусков (при обработке в один переход) М7 (СМ1...СМ2)	пропитанные бакелитом
Характеристика СОЖ, %	
- масло индустриальное И-5А ГОСТ 20799-75	96...98
- олеиновая кислота марки "Б", вязкость Сст (при t=50°)	2...4
Количество СОЖ, л	200
Количество масла в гидростанции, л	95
Рабочая жидкость гидросистемы	масло индустриальное И-5А ГОСТ 20799-75
Емкость бака насосной станции, л	200
Суммарная установленная мощность электродвигателей, кВт	5.5
Уровень шума, дБл	не более 85
Габаритный размеры автомата, мм	800×800×1900
Масса, кг	
Способ базирования	гидростатическое центрирование с механическим, электромагнитным или комбинированным прижимом по торцу обрабатываемого кольца

Угол качания инструментальной головки с расположенными на ней абразивными брусками меняется путем замены эксцентрикового вала. Базирование колец в радиальном направлении осуществляется на неподвижной гидростатической опоре. Для центрирования используется смазывающе-охлаждающая жидкость автомата. Прижим кольца по торцу осуществляется прижимным самоустанавливающимся упором или электромагнитным патроном, возможен комбинированный прижим.

Очистка охлаждающей жидкости осуществляется центрифугой.

Компоновка автомата представлена в приложении 15. Он состоит из бабки изделия 1, инструментальной головки 2, автооператора 3, станины 4, электрошкафа 5, гидростанции 6, насосной станции 7 и устройства центробежной очистки 8.

Бабка изделия (приложение 16) предназначена для вращения обрабатываемого кольца и перемещения его в зону обработки и обратно. Бабка изделия имеет устройство гидростатического центрирования. Она состоит из корпуса 1, выполненного в виде цилиндра, в котором на гидростатических опорах 2 и 3 размещен корпус шпинделя изделия 4, выполненный в виде поршня.

В корпусе шпинделя на подшипниках смонтирован полый вал 5, внутри которого также на подшипниках расположен шток 6, в верхней части которого установлена гидроопора 7.

В верхней части вала 5 закреплен упорный фланец 8, а в нижней - шкив 9. Вращение вала шпинделя изделия осуществляется через клиноременную передачу от электродвигателя переменного тока.

В штоках 11, 6 и гидроопоре 7 имеются каналы для подачи центрирующей жидкости.

При необходимости станок оснащается электромагнитным патроном, закрепляемым в верхней части корпуса шпинделя изделия.

Инструментальная головка (приложение 17) содержит абразивные бруски и состоит из корпуса 1, в котором на сферических двухрядных шарикоподшипниках расположен эксцентриковый вал 2, который при помощи радиальных шарикоподшипников размещен на оси 3, закрепленной на стойке 4. В нижней части корпуса 1 установлен самоцентрирующийся 4- кулачковый патрон, состоящий из корпуса 5, в котором размещены диск 6 и кулачки 7, с прикрепленными к ним держателями 8 абразивных брусков 9.

Для осуществления перемещения кулачков в радиальном направлении предназначен механизм, состоящий из цилиндра 10, поршня 11, рейки 12.

В полый части оси 3 находится торсион, который при помощи шарниров входит в зацепление с валиком 14 и диском 6. Вращение эксцентрикового вала 2 осуществляется от электродвигателя постоянного тока 17 через клиноременную передачу.

В конструкции инструментальной головки предусмотрено устройство, исключаящее ее круговое перемещение.

Для осуществления загрузки и выгрузки колец из зоны обработки автомат оснащен автооператором (приложение 18). Автооператор состоит из загрузочного лотка 1, цилиндра 5, поршня-штока 4 с толкателем 3, который из загрузочного лотка доставляет в зону загрузки 6 подлежащее обработке кольцо 2, откуда шпинделем 8 оно направляется в зону обработки. После окончания обработки кольцо поступает в отводной лоток 7.

Для подачи СОЖ в зону обработки и в каналы гидростатической опоры предусмотрена насосная станция (приложение 19), состоящая из бака 1, насоса 2 и электродвигателя 3. Для очистки СОЖ от продуктов резания станок оснащен устройством центробежной очистки, в которое входит бак 1, сепаратор 2 и электродвигатель 3 (приложение 20).

Гидростанция (приложение 21) предназначена для подачи рабочей жидкости в гидросистему станка. Она состоит из бака 1, на котором размещены пакеты гидрораспределителей 4, редукционных клапанов 5 и дросселей 6. В состав гидростанции также входит насос 2 и электродвигатель 3.

Главные и вспомогательные движения исполнительных органов автомата обеспечивает его гидрокинематическая схема (приложение 22). Так, вращение шпинделя изделия осуществляется от электродвигателя М1 посредством клиноременной передачи.

Подвод и отвод шпинделя изделия производится с помощью гидропривода. При этом масло от гидростанции подается насосом 20 через фильтр 21, обратный клапан 19, предохранительный клапан 18, редукционный клапан 9, гидрораспределители 11 и дроссель 13 в нижнюю полость цилиндра 52 бабки изделия, вследствие чего происходит подъем шпинделя изделия в верхнее, рабочее положение. При переключении гидрораспределителя 11 масло поступает в верхнюю полость цилиндра 52 и шпиндель изделия перемещается в исходное нерабочее положение.

Качание абразивных брусков, закрепленных на кулачках патрона инструментальной головки, осуществляется от электродвигателя М5 через клиноременную передачу. Разжим и сжатие абразивных брусков происходит в процессе перемещения поршня 11 (см. приложение 17). При этом рейка 12, установленная на штоке поршня 11, проворачивает шестерню 13, жестко закрепленную на валу 14. При повороте вала 14 проворачивается торсион 16, входящий в зацепление с валом 14 и диском 6. При повороте диска 6 кулачки с закрепленными на них держателями и брусками перемещаются по своим направляющим, обеспечивая заданное усилие прижима брусков.

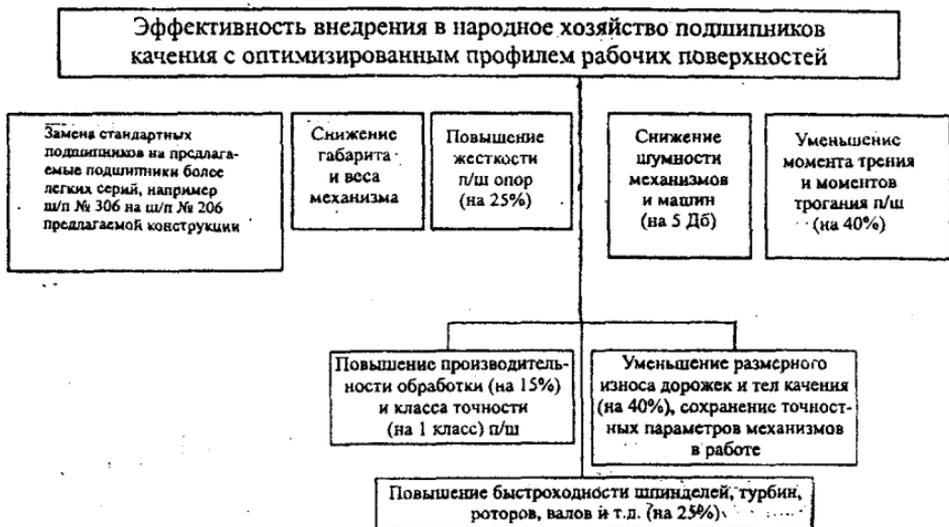
Для обработки наружных колец подшипников спроектирован и внедрен в производство автомат модели ВДА-70Н. По конструкции основных узлов он ничем не отличается от автомата модели ВДА-30В, а незначительные конструктивные изменения внесены лишь в конструкцию держателей абразивных брусков. Внедрение этих станков на Саратовском подшипниковом заводе позволило получить годовой экономический эффект в размере 761000600 руб.

Выполненные исследования позволяют расширить технологические возможности суперфиниширования в направлении повышения его эффективности, формообразующих свойств, точностных и качественных показателей процесса. Рациональная кинематика перемещения брусков по

обрабатываемой поверхности дает возможность не только улучшать ее чистоту, но и активно исправлять погрешности геометрической формы заготовки в продольном и поперечном сечениях, оставшиеся после предшествующей обработки. Поэтому полученные результаты могут быть использованы не только в подшипниковой промышленности, но и в других отраслях народного хозяйства, где предъявляются повышенные требования к качеству изготовления поверхностей высокоточных деталей.

Предложенные в работе технологии и оборудование дают возможность изготавливать подшипники качения с оптимизированными геометрическими параметрами профиля рабочих поверхностей их деталей. Эти подшипники обладают повышенными эксплуатационными свойствами и могут быть использованы, практически, во всех отраслях народного хозяйства, с успехом заменив стандартные подшипники как в узлах массового применения, так и в особо ответственных механизмах. Применение данных подшипников в авиационной, космической технике, приборостроении, автомобилестроении, железнодорожном транспорте и т.д. позволит повысить режимы эксплуатации машин и приборов, а также обеспечить повышенную надежность и долговечность их функционирования.

Повышенная работоспособность подшипников новой конструкции обеспечит замену стандартных подшипников тяжелых серий на предлагаемые подшипники более легких серий, что приведет к уменьшению веса и габаритных размеров подшипниковых узлов, их материалоемкости и себестоимости. Кроме того, полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании и изготовлении подшипников как массового назначения, так и специальных, предназначенных для работы в строго определенных условиях эксплуатации. Составляющие эффективности использования подшипников с повышенными эксплуатационными свойствами в народном хозяйстве представлены на рис.3.10.



*Рис. 3.10. Составляющие эффективности использования п/ш с рациональной геометрией контакта в народном хозяйстве*

В процессе выполнения работы произведено внедрение подшипников, изготовленных с использованием предлагаемых технологий, в Саратовском трамвайно-троллейбусном управлении и в Саратовском акционерном обществе САПКОН. Опытные подшипники устанавливали взамен стандартных в электродвигатели трамваев и троллейбусов. Тяжелые условия работы, связанные с повышенной запыленностью и абразивным износом рабочих поверхностей деталей подшипников приводили к быстрому разрушению подшипниковых опор или к нарушению требуемых зазоров между статором и ротором электродвигателей. Использование в этих условиях подшипников с оптимизированной формой профиля контактирующих поверхностей позволило повысить ресурс работы электродвигателей в 2 раза, снизить затраты на их ремонт и уменьшить время простоев подвижного состава. В результате этого получен годового экономического эффект в размере 153512 рублей в ценах до 1991 года.

В АО САПКОН подшипники предлагаемой конструкции устанавливали в центробежные насосы мод. 1Д 1250-125-А-УХЛ4 и плунжерные насосы мод. ГНД, НД и НДМ. Годовой экономический эффект, полученный за счет увеличения срока службы насосов более чем в 2 раза, составил 236479000 рублей.

В приложении 23-27 представлены материалы, касающиеся новейших разработок НПП НИМ в области подшипникового производства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе комплексных теоретических и экспериментальных исследований показана эффективность технологии многобрускового суперфиниширования деталей с локализацией зоны резания, позволяющей не только повысить производительность, но и обеспечить активное снижение некруглости и прецизионное формирование профиля обрабатываемой поверхности. Наиболее перспективной схемой брусковой обработки, обеспечивающей как высокую производительность снятия дефектных слоев, так и удаление с обрабатываемой поверхности гармоник низких номеров, является многобрусковая схема с жесткой кинематической связью между брусками через жесткие самотормозящиеся звенья.

2. Обоснована необходимость рационального профилирования рабочих поверхностей ответственных деталей машин и приборов с целью повышения их работоспособности и надежности. Установлено, что параболический профиль дорожки качения с показателем формы  $p=4-6$  обеспечивает благоприятные контактные условия даже при работе подшипника в условиях перекоса колец и дает возможность повысить в 3-6 раз его эксплуатационные характеристики.

3. По результатам исследований спроектировано, изготовлено и внедрено в производство технологическое оборудование для многобрусковой доводки дорожек качения колец подшипников. Организовано серийное производство автоматов серий МДА, КХВ и ВДА.







# ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Номер эксперимента: 1      Дата проведения: 1980-1981  
 Место проведения: Чувашский И.Х. Омский филиал ФГУП "ВНИИЗЖ"  
 Руководитель: И.И. Иванов      Состав группы: И.И. Иванов, А.А. Петров, В.В. Сидоров

Цели эксперимента	Изучение влияния факторов X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> на урожайность (Y) при различных уровнях факторов X <sub>4</sub> , X <sub>5</sub> .
Объект исследования	Урожайность (Y) в т/га.
Факторы	X <sub>1</sub> - сорт, X <sub>2</sub> - норма высева, X <sub>3</sub> - дата посева, X <sub>4</sub> - сорт, X <sub>5</sub> - норма высева.
Уровни факторов	X <sub>1</sub> : 1, 2, 3; X <sub>2</sub> : 1, 2; X <sub>3</sub> : 1, 2; X <sub>4</sub> : 1, 2; X <sub>5</sub> : 1, 2.

№ опыта	Факторы					Y	S <sub>y</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>	S <sub>16</sub>	S <sub>17</sub>	S <sub>18</sub>	S <sub>19</sub>	S <sub>20</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>23</sub>	S <sub>24</sub>	S <sub>25</sub>	S <sub>26</sub>	S <sub>27</sub>	S <sub>28</sub>	S <sub>29</sub>	S <sub>30</sub>	S <sub>31</sub>	S <sub>32</sub>	S <sub>33</sub>	S <sub>34</sub>	S <sub>35</sub>	S <sub>36</sub>	S <sub>37</sub>	S <sub>38</sub>	S <sub>39</sub>	S <sub>40</sub>	S <sub>41</sub>	S <sub>42</sub>	S <sub>43</sub>	S <sub>44</sub>	S <sub>45</sub>	S <sub>46</sub>	S <sub>47</sub>	S <sub>48</sub>	S <sub>49</sub>	S <sub>50</sub>	S <sub>51</sub>	S <sub>52</sub>	S <sub>53</sub>	S <sub>54</sub>	S <sub>55</sub>	S <sub>56</sub>	S <sub>57</sub>	S <sub>58</sub>	S <sub>59</sub>	S <sub>60</sub>	S <sub>61</sub>	S <sub>62</sub>	S <sub>63</sub>	S <sub>64</sub>	S <sub>65</sub>	S <sub>66</sub>	S <sub>67</sub>	S <sub>68</sub>	S <sub>69</sub>	S <sub>70</sub>	S <sub>71</sub>	S <sub>72</sub>	S <sub>73</sub>	S <sub>74</sub>	S <sub>75</sub>	S <sub>76</sub>	S <sub>77</sub>	S <sub>78</sub>	S <sub>79</sub>	S <sub>80</sub>	S <sub>81</sub>	S <sub>82</sub>	S <sub>83</sub>	S <sub>84</sub>	S <sub>85</sub>	S <sub>86</sub>	S <sub>87</sub>	S <sub>88</sub>	S <sub>89</sub>	S <sub>90</sub>	S <sub>91</sub>	S <sub>92</sub>	S <sub>93</sub>	S <sub>94</sub>	S <sub>95</sub>	S <sub>96</sub>	S <sub>97</sub>	S <sub>98</sub>	S <sub>99</sub>	S <sub>100</sub>	S <sub>101</sub>	S <sub>102</sub>	S <sub>103</sub>	S <sub>104</sub>	S <sub>105</sub>	S <sub>106</sub>	S <sub>107</sub>	S <sub>108</sub>	S <sub>109</sub>	S <sub>110</sub>	S <sub>111</sub>	S <sub>112</sub>	S <sub>113</sub>	S <sub>114</sub>	S <sub>115</sub>	S <sub>116</sub>	S <sub>117</sub>	S <sub>118</sub>	S <sub>119</sub>	S <sub>120</sub>	S <sub>121</sub>	S <sub>122</sub>	S <sub>123</sub>	S <sub>124</sub>	S <sub>125</sub>	S <sub>126</sub>	S <sub>127</sub>	S <sub>128</sub>	S <sub>129</sub>	S <sub>130</sub>	S <sub>131</sub>	S <sub>132</sub>	S <sub>133</sub>	S <sub>134</sub>	S <sub>135</sub>	S <sub>136</sub>	S <sub>137</sub>	S <sub>138</sub>	S <sub>139</sub>	S <sub>140</sub>	S <sub>141</sub>	S <sub>142</sub>	S <sub>143</sub>	S <sub>144</sub>	S <sub>145</sub>	S <sub>146</sub>	S <sub>147</sub>	S <sub>148</sub>	S <sub>149</sub>	S <sub>150</sub>	S <sub>151</sub>	S <sub>152</sub>	S <sub>153</sub>	S <sub>154</sub>	S <sub>155</sub>	S <sub>156</sub>	S <sub>157</sub>	S <sub>158</sub>	S <sub>159</sub>	S <sub>160</sub>	S <sub>161</sub>	S <sub>162</sub>	S <sub>163</sub>	S <sub>164</sub>	S <sub>165</sub>	S <sub>166</sub>	S <sub>167</sub>	S <sub>168</sub>	S <sub>169</sub>	S <sub>170</sub>	S <sub>171</sub>	S <sub>172</sub>	S <sub>173</sub>	S <sub>174</sub>	S <sub>175</sub>	S <sub>176</sub>	S <sub>177</sub>	S <sub>178</sub>	S <sub>179</sub>	S <sub>180</sub>	S <sub>181</sub>	S <sub>182</sub>	S <sub>183</sub>	S <sub>184</sub>	S <sub>185</sub>	S <sub>186</sub>	S <sub>187</sub>	S <sub>188</sub>	S <sub>189</sub>	S <sub>190</sub>	S <sub>191</sub>	S <sub>192</sub>	S <sub>193</sub>	S <sub>194</sub>	S <sub>195</sub>	S <sub>196</sub>	S <sub>197</sub>	S <sub>198</sub>	S <sub>199</sub>	S <sub>200</sub>	S <sub>201</sub>	S <sub>202</sub>	S <sub>203</sub>	S <sub>204</sub>	S <sub>205</sub>	S <sub>206</sub>	S <sub>207</sub>	S <sub>208</sub>	S <sub>209</sub>	S <sub>210</sub>	S <sub>211</sub>	S <sub>212</sub>	S <sub>213</sub>	S <sub>214</sub>	S <sub>215</sub>	S <sub>216</sub>	S <sub>217</sub>	S <sub>218</sub>	S <sub>219</sub>	S <sub>220</sub>	S <sub>221</sub>	S <sub>222</sub>	S <sub>223</sub>	S <sub>224</sub>	S <sub>225</sub>	S <sub>226</sub>	S <sub>227</sub>	S <sub>228</sub>	S <sub>229</sub>	S <sub>230</sub>	S <sub>231</sub>	S <sub>232</sub>	S <sub>233</sub>	S <sub>234</sub>	S <sub>235</sub>	S <sub>236</sub>	S <sub>237</sub>	S <sub>238</sub>	S <sub>239</sub>	S <sub>240</sub>	S <sub>241</sub>	S <sub>242</sub>	S <sub>243</sub>	S <sub>244</sub>	S <sub>245</sub>	S <sub>246</sub>	S <sub>247</sub>	S <sub>248</sub>	S <sub>249</sub>	S <sub>250</sub>	S <sub>251</sub>	S <sub>252</sub>	S <sub>253</sub>	S <sub>254</sub>	S <sub>255</sub>	S <sub>256</sub>	S <sub>257</sub>	S <sub>258</sub>	S <sub>259</sub>	S <sub>260</sub>	S <sub>261</sub>	S <sub>262</sub>	S <sub>263</sub>	S <sub>264</sub>	S <sub>265</sub>	S <sub>266</sub>	S <sub>267</sub>	S <sub>268</sub>	S <sub>269</sub>	S <sub>270</sub>	S <sub>271</sub>	S <sub>272</sub>	S <sub>273</sub>	S <sub>274</sub>	S <sub>275</sub>	S <sub>276</sub>	S <sub>277</sub>	S <sub>278</sub>	S <sub>279</sub>	S <sub>280</sub>	S <sub>281</sub>	S <sub>282</sub>	S <sub>283</sub>	S <sub>284</sub>	S <sub>285</sub>	S <sub>286</sub>	S <sub>287</sub>	S <sub>288</sub>	S <sub>289</sub>	S <sub>290</sub>	S <sub>291</sub>	S <sub>292</sub>	S <sub>293</sub>	S <sub>294</sub>	S <sub>295</sub>	S <sub>296</sub>	S <sub>297</sub>	S <sub>298</sub>	S <sub>299</sub>	S <sub>300</sub>	S <sub>301</sub>	S <sub>302</sub>	S <sub>303</sub>	S <sub>304</sub>	S <sub>305</sub>	S <sub>306</sub>	S <sub>307</sub>	S <sub>308</sub>	S <sub>309</sub>	S <sub>310</sub>	S <sub>311</sub>	S <sub>312</sub>	S <sub>313</sub>	S <sub>314</sub>	S <sub>315</sub>	S <sub>316</sub>	S <sub>317</sub>	S <sub>318</sub>	S <sub>319</sub>	S <sub>320</sub>	S <sub>321</sub>	S <sub>322</sub>	S <sub>323</sub>	S <sub>324</sub>	S <sub>325</sub>	S <sub>326</sub>	S <sub>327</sub>	S <sub>328</sub>	S <sub>329</sub>	S <sub>330</sub>	S <sub>331</sub>	S <sub>332</sub>	S <sub>333</sub>	S <sub>334</sub>	S <sub>335</sub>	S <sub>336</sub>	S <sub>337</sub>	S <sub>338</sub>	S <sub>339</sub>	S <sub>340</sub>	S <sub>341</sub>	S <sub>342</sub>	S <sub>343</sub>	S <sub>344</sub>	S <sub>345</sub>	S <sub>346</sub>	S <sub>347</sub>	S <sub>348</sub>	S <sub>349</sub>	S <sub>350</sub>	S <sub>351</sub>	S <sub>352</sub>	S <sub>353</sub>	S <sub>354</sub>	S <sub>355</sub>	S <sub>356</sub>	S <sub>357</sub>	S <sub>358</sub>	S <sub>359</sub>	S <sub>360</sub>	S <sub>361</sub>	S <sub>362</sub>	S <sub>363</sub>	S <sub>364</sub>	S <sub>365</sub>	S <sub>366</sub>	S <sub>367</sub>	S <sub>368</sub>	S <sub>369</sub>	S <sub>370</sub>	S <sub>371</sub>	S <sub>372</sub>	S <sub>373</sub>	S <sub>374</sub>	S <sub>375</sub>	S <sub>376</sub>	S <sub>377</sub>	S <sub>378</sub>	S <sub>379</sub>	S <sub>380</sub>	S <sub>381</sub>	S <sub>382</sub>	S <sub>383</sub>	S <sub>384</sub>	S <sub>385</sub>	S <sub>386</sub>	S <sub>387</sub>	S <sub>388</sub>	S <sub>389</sub>	S <sub>390</sub>	S <sub>391</sub>	S <sub>392</sub>	S <sub>393</sub>	S <sub>394</sub>	S <sub>395</sub>	S <sub>396</sub>	S <sub>397</sub>	S <sub>398</sub>	S <sub>399</sub>	S <sub>400</sub>	S <sub>401</sub>	S <sub>402</sub>	S <sub>403</sub>	S <sub>404</sub>	S <sub>405</sub>	S <sub>406</sub>	S <sub>407</sub>	S <sub>408</sub>	S <sub>409</sub>	S <sub>410</sub>	S <sub>411</sub>	S <sub>412</sub>	S <sub>413</sub>	S <sub>414</sub>	S <sub>415</sub>	S <sub>416</sub>	S <sub>417</sub>	S <sub>418</sub>	S <sub>419</sub>	S <sub>420</sub>	S <sub>421</sub>	S <sub>422</sub>	S <sub>423</sub>	S <sub>424</sub>	S <sub>425</sub>	S <sub>426</sub>	S <sub>427</sub>	S <sub>428</sub>	S <sub>429</sub>	S <sub>430</sub>	S <sub>431</sub>	S <sub>432</sub>	S <sub>433</sub>	S <sub>434</sub>	S <sub>435</sub>	S <sub>436</sub>	S <sub>437</sub>	S <sub>438</sub>	S <sub>439</sub>	S <sub>440</sub>	S <sub>441</sub>	S <sub>442</sub>	S <sub>443</sub>	S <sub>444</sub>	S <sub>445</sub>	S <sub>446</sub>	S <sub>447</sub>	S <sub>448</sub>	S <sub>449</sub>	S <sub>450</sub>	S <sub>451</sub>	S <sub>452</sub>	S <sub>453</sub>	S <sub>454</sub>	S <sub>455</sub>	S <sub>456</sub>	S <sub>457</sub>	S <sub>458</sub>	S <sub>459</sub>	S <sub>460</sub>	S <sub>461</sub>	S <sub>462</sub>	S <sub>463</sub>	S <sub>464</sub>	S <sub>465</sub>	S <sub>466</sub>	S <sub>467</sub>	S <sub>468</sub>	S <sub>469</sub>	S <sub>470</sub>	S <sub>471</sub>	S <sub>472</sub>	S <sub>473</sub>	S <sub>474</sub>	S <sub>475</sub>	S <sub>476</sub>	S <sub>477</sub>	S <sub>478</sub>	S <sub>479</sub>	S <sub>480</sub>	S <sub>481</sub>	S <sub>482</sub>	S <sub>483</sub>	S <sub>484</sub>	S <sub>485</sub>	S <sub>486</sub>	S <sub>487</sub>	S <sub>488</sub>	S <sub>489</sub>	S <sub>490</sub>	S <sub>491</sub>	S <sub>492</sub>	S <sub>493</sub>	S <sub>494</sub>	S <sub>495</sub>	S <sub>496</sub>	S <sub>497</sub>	S <sub>498</sub>	S <sub>499</sub>	S <sub>500</sub>	S <sub>501</sub>	S <sub>502</sub>	S <sub>503</sub>	S <sub>504</sub>	S <sub>505</sub>	S <sub>506</sub>	S <sub>507</sub>	S <sub>508</sub>	S <sub>509</sub>	S <sub>510</sub>	S <sub>511</sub>	S <sub>512</sub>	S <sub>513</sub>	S <sub>514</sub>	S <sub>515</sub>	S <sub>516</sub>	S <sub>517</sub>	S <sub>518</sub>	S <sub>519</sub>	S <sub>520</sub>	S <sub>521</sub>	S <sub>522</sub>	S <sub>523</sub>	S <sub>524</sub>	S <sub>525</sub>	S <sub>526</sub>	S <sub>527</sub>	S <sub>528</sub>	S <sub>529</sub>	S <sub>530</sub>	S <sub>531</sub>	S <sub>532</sub>	S <sub>533</sub>	S <sub>534</sub>	S <sub>535</sub>	S <sub>536</sub>	S <sub>537</sub>	S <sub>538</sub>	S <sub>539</sub>	S <sub>540</sub>	S <sub>541</sub>	S <sub>542</sub>	S <sub>543</sub>	S <sub>544</sub>	S <sub>545</sub>	S <sub>546</sub>	S <sub>547</sub>	S <sub>548</sub>	S <sub>549</sub>	S <sub>550</sub>	S <sub>551</sub>	S <sub>552</sub>	S <sub>553</sub>	S <sub>554</sub>	S <sub>555</sub>	S <sub>556</sub>	S <sub>557</sub>	S <sub>558</sub>	S <sub>559</sub>	S <sub>560</sub>	S <sub>561</sub>	S <sub>562</sub>	S <sub>563</sub>	S <sub>564</sub>	S <sub>565</sub>	S <sub>566</sub>	S <sub>567</sub>	S <sub>568</sub>	S <sub>569</sub>	S <sub>570</sub>	S <sub>571</sub>	S <sub>572</sub>	S <sub>573</sub>	S <sub>574</sub>	S <sub>575</sub>	S <sub>576</sub>	S <sub>577</sub>	S <sub>578</sub>	S <sub>579</sub>	S <sub>580</sub>	S <sub>581</sub>	S <sub>582</sub>	S <sub>583</sub>	S <sub>584</sub>	S <sub>585</sub>	S <sub>586</sub>	S <sub>587</sub>	S <sub>588</sub>	S <sub>589</sub>	S <sub>590</sub>	S <sub>591</sub>	S <sub>592</sub>	S <sub>593</sub>	S <sub>594</sub>	S <sub>595</sub>	S <sub>596</sub>	S <sub>597</sub>	S <sub>598</sub>	S <sub>599</sub>	S <sub>600</sub>	S <sub>601</sub>	S <sub>602</sub>	S <sub>603</sub>	S <sub>604</sub>	S <sub>605</sub>	S <sub>606</sub>	S <sub>607</sub>	S <sub>608</sub>	S <sub>609</sub>	S <sub>610</sub>	S <sub>611</sub>	S <sub>612</sub>	S <sub>613</sub>	S <sub>614</sub>	S <sub>615</sub>	S <sub>616</sub>	S <sub>617</sub>	S <sub>618</sub>	S <sub>619</sub>	S <sub>620</sub>	S <sub>621</sub>	S <sub>622</sub>	S <sub>623</sub>	S <sub>624</sub>	S <sub>625</sub>	S <sub>626</sub>	S <sub>627</sub>	S <sub>628</sub>	S <sub>629</sub>	S <sub>630</sub>	S <sub>631</sub>	S <sub>632</sub>	S <sub>633</sub>	S <sub>634</sub>	S <sub>635</sub>	S <sub>636</sub>	S <sub>637</sub>	S <sub>638</sub>	S <sub>639</sub>	S <sub>640</sub>	S <sub>641</sub>	S <sub>642</sub>	S <sub>643</sub>	S <sub>644</sub>	S <sub>645</sub>	S <sub>646</sub>	S <sub>647</sub>	S <sub>648</sub>	S <sub>649</sub>	S <sub>650</sub>	S <sub>651</sub>	S <sub>652</sub>	S <sub>653</sub>	S <sub>654</sub>	S <sub>655</sub>	S <sub>656</sub>	S <sub>657</sub>	S <sub>658</sub>	S <sub>659</sub>	S <sub>660</sub>	S <sub>661</sub>	S <sub>662</sub>	S <sub>663</sub>	S <sub>664</sub>
---------	---------	--	--	--	--	---	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------









# ЖУРНАЛ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

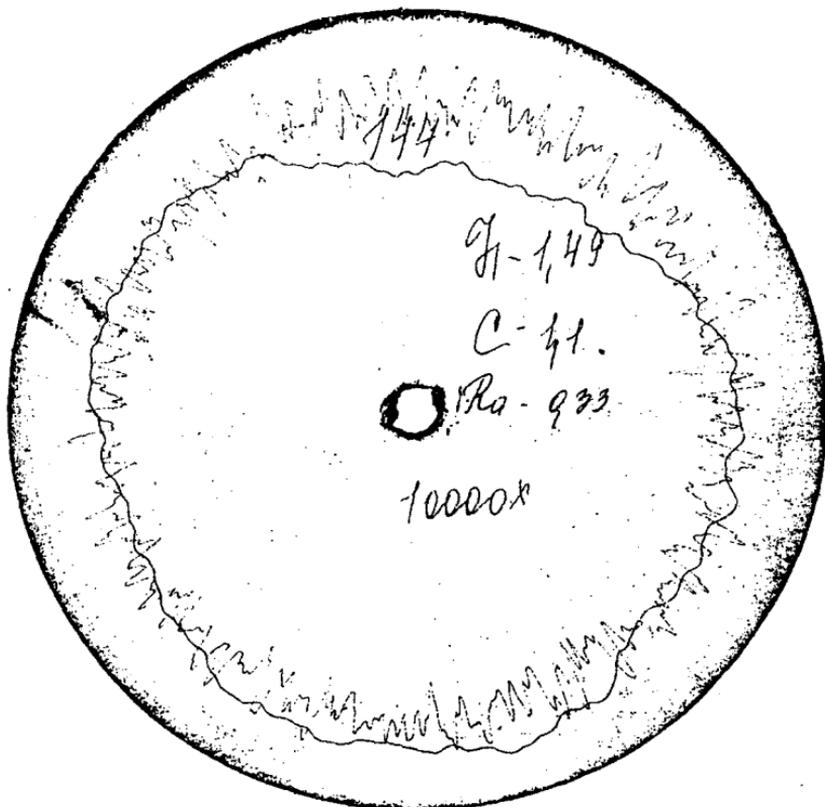
Планирование 9

Объемные единицы

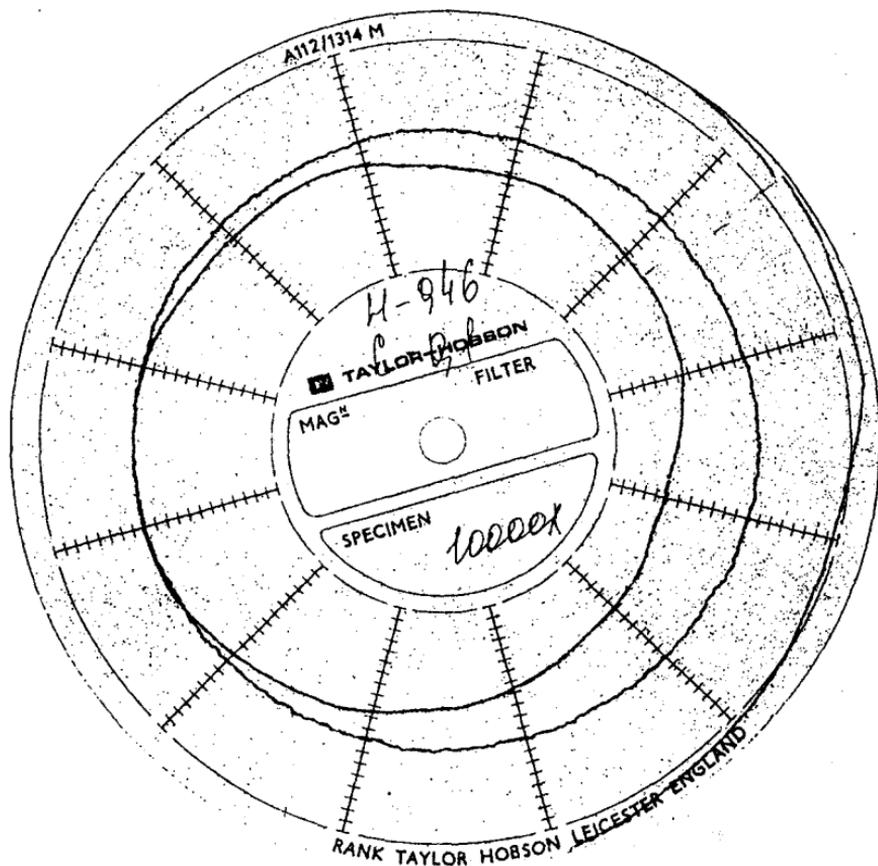
№ 3

Контролируемые факторы	T, c	НРА, ер	3, мм	Аварийные сведения	Оценка коэффициентов	Объем																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Верхний уровень	10	50	14	4. Число выходов из строя		$\Delta_{\text{ср}} = f(T, \text{НРА}, 3)$																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Нижний уровень	3	20	7	Финансирование работ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Основной уровень	11.5	35	10.5	Бюджетные средства																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Интервал варьирования	8.5	15	3.5	Средства на материалы																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Материал планирования помощи факторного эксперимента или прогноза факторное экспериментальное задание в рабочих обозначениях параметров																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Контролируемые режимы, параметры, факторы																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Фактор	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{18}$	$X_{19}$	$X_{20}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$	$X_{26}$	$X_{27}$	$X_{28}$	$X_{29}$	$X_{30}$	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{34}$	$X_{35}$	$X_{36}$	$X_{37}$	$X_{38}$	$X_{39}$	$X_{40}$	$X_{41}$	$X_{42}$	$X_{43}$	$X_{44}$	$X_{45}$	$X_{46}$	$X_{47}$	$X_{48}$	$X_{49}$	$X_{50}$	$X_{51}$	$X_{52}$	$X_{53}$	$X_{54}$	$X_{55}$	$X_{56}$	$X_{57}$	$X_{58}$	$X_{59}$	$X_{60}$	$X_{61}$	$X_{62}$	$X_{63}$	$X_{64}$	$X_{65}$	$X_{66}$	$X_{67}$	$X_{68}$	$X_{69}$	$X_{70}$	$X_{71}$	$X_{72}$	$X_{73}$	$X_{74}$	$X_{75}$	$X_{76}$	$X_{77}$	$X_{78}$	$X_{79}$	$X_{80}$	$X_{81}$	$X_{82}$	$X_{83}$	$X_{84}$	$X_{85}$	$X_{86}$	$X_{87}$	$X_{88}$	$X_{89}$	$X_{90}$	$X_{91}$	$X_{92}$	$X_{93}$	$X_{94}$	$X_{95}$	$X_{96}$	$X_{97}$	$X_{98}$	$X_{99}$	$X_{100}$	$X_{101}$	$X_{102}$	$X_{103}$	$X_{104}$	$X_{105}$	$X_{106}$	$X_{107}$	$X_{108}$	$X_{109}$	$X_{110}$	$X_{111}$	$X_{112}$	$X_{113}$	$X_{114}$	$X_{115}$	$X_{116}$	$X_{117}$	$X_{118}$	$X_{119}$	$X_{120}$	$X_{121}$	$X_{122}$	$X_{123}$	$X_{124}$	$X_{125}$	$X_{126}$	$X_{127}$	$X_{128}$	$X_{129}$	$X_{130}$	$X_{131}$	$X_{132}$	$X_{133}$	$X_{134}$	$X_{135}$	$X_{136}$	$X_{137}$	$X_{138}$	$X_{139}$	$X_{140}$	$X_{141}$	$X_{142}$	$X_{143}$	$X_{144}$	$X_{145}$	$X_{146}$	$X_{147}$	$X_{148}$	$X_{149}$	$X_{150}$	$X_{151}$	$X_{152}$	$X_{153}$	$X_{154}$	$X_{155}$	$X_{156}$	$X_{157}$	$X_{158}$	$X_{159}$	$X_{160}$	$X_{161}$	$X_{162}$	$X_{163}$	$X_{164}$	$X_{165}$	$X_{166}$	$X_{167}$	$X_{168}$	$X_{169}$	$X_{170}$	$X_{171}$	$X_{172}$	$X_{173}$	$X_{174}$	$X_{175}$	$X_{176}$	$X_{177}$	$X_{178}$	$X_{179}$	$X_{180}$	$X_{181}$	$X_{182}$	$X_{183}$	$X_{184}$	$X_{185}$	$X_{186}$	$X_{187}$	$X_{188}$	$X_{189}$	$X_{190}$	$X_{191}$	$X_{192}$	$X_{193}$	$X_{194}$	$X_{195}$	$X_{196}$	$X_{197}$	$X_{198}$	$X_{199}$	$X_{200}$	$X_{201}$	$X_{202}$	$X_{203}$	$X_{204}$	$X_{205}$	$X_{206}$	$X_{207}$	$X_{208}$	$X_{209}$	$X_{210}$	$X_{211}$	$X_{212}$	$X_{213}$	$X_{214}$	$X_{215}$	$X_{216}$	$X_{217}$	$X_{218}$	$X_{219}$	$X_{220}$	$X_{221}$	$X_{222}$	$X_{223}$	$X_{224}$	$X_{225}$	$X_{226}$	$X_{227}$	$X_{228}$	$X_{229}$	$X_{230}$	$X_{231}$	$X_{232}$	$X_{233}$	$X_{234}$	$X_{235}$	$X_{236}$	$X_{237}$	$X_{238}$	$X_{239}$	$X_{240}$	$X_{241}$	$X_{242}$	$X_{243}$	$X_{244}$	$X_{245}$	$X_{246}$	$X_{247}$	$X_{248}$	$X_{249}$	$X_{250}$	$X_{251}$	$X_{252}$	$X_{253}$	$X_{254}$	$X_{255}$	$X_{256}$	$X_{257}$	$X_{258}$	$X_{259}$	$X_{260}$	$X_{261}$	$X_{262}$	$X_{263}$	$X_{264}$	$X_{265}$	$X_{266}$	$X_{267}$	$X_{268}$	$X_{269}$	$X_{270}$	$X_{271}$	$X_{272}$	$X_{273}$	$X_{274}$	$X_{275}$	$X_{276}$	$X_{277}$	$X_{278}$	$X_{279}$	$X_{280}$	$X_{281}$	$X_{282}$	$X_{283}$	$X_{284}$	$X_{285}$	$X_{286}$	$X_{287}$	$X_{288}$	$X_{289}$	$X_{290}$	$X_{291}$	$X_{292}$	$X_{293}$	$X_{294}$	$X_{295}$	$X_{296}$	$X_{297}$	$X_{298}$	$X_{299}$	$X_{300}$	$X_{301}$	$X_{302}$	$X_{303}$	$X_{304}$	$X_{305}$	$X_{306}$	$X_{307}$	$X_{308}$	$X_{309}$	$X_{310}$	$X_{311}$	$X_{312}$	$X_{313}$	$X_{314}$	$X_{315}$	$X_{316}$	$X_{317}$	$X_{318}$	$X_{319}$	$X_{320}$	$X_{321}$	$X_{322}$	$X_{323}$	$X_{324}$	$X_{325}$	$X_{326}$	$X_{327}$	$X_{328}$	$X_{329}$	$X_{330}$	$X_{331}$	$X_{332}$	$X_{333}$	$X_{334}$	$X_{335}$	$X_{336}$	$X_{337}$	$X_{338}$	$X_{339}$	$X_{340}$	$X_{341}$	$X_{342}$	$X_{343}$	$X_{344}$	$X_{345}$	$X_{346}$	$X_{347}$	$X_{348}$	$X_{349}$	$X_{350}$	$X_{351}$	$X_{352}$	$X_{353}$	$X_{354}$	$X_{355}$	$X_{356}$	$X_{357}$	$X_{358}$	$X_{359}$	$X_{360}$	$X_{361}$	$X_{362}$	$X_{363}$	$X_{364}$	$X_{365}$	$X_{366}$	$X_{367}$	$X_{368}$	$X_{369}$	$X_{370}$	$X_{371}$	$X_{372}$	$X_{373}$	$X_{374}$	$X_{375}$	$X_{376}$	$X_{377}$	$X_{378}$	$X_{379}$	$X_{380}$	$X_{381}$	$X_{382}$	$X_{383}$	$X_{384}$	$X_{385}$	$X_{386}$	$X_{387}$	$X_{388}$	$X_{389}$	$X_{390}$	$X_{391}$	$X_{392}$	$X_{393}$	$X_{394}$	$X_{395}$	$X_{396}$	$X_{397}$	$X_{398}$	$X_{399}$	$X_{400}$	$X_{401}$	$X_{402}$	$X_{403}$	$X_{404}$	$X_{405}$	$X_{406}$	$X_{407}$	$X_{408}$	$X_{409}$	$X_{410}$	$X_{411}$	$X_{412}$	$X_{413}$	$X_{414}$	$X_{415}$	$X_{416}$	$X_{417}$	$X_{418}$	$X_{419}$	$X_{420}$	$X_{421}$	$X_{422}$	$X_{423}$	$X_{424}$	$X_{425}$	$X_{426}$	$X_{427}$	$X_{428}$	$X_{429}$	$X_{430}$	$X_{431}$	$X_{432}$	$X_{433}$	$X_{434}$	$X_{435}$	$X_{436}$	$X_{437}$	$X_{438}$	$X_{439}$	$X_{440}$	$X_{441}$	$X_{442}$	$X_{443}$	$X_{444}$	$X_{445}$	$X_{446}$	$X_{447}$	$X_{448}$	$X_{449}$	$X_{450}$	$X_{451}$	$X_{452}$	$X_{453}$	$X_{454}$	$X_{455}$	$X_{456}$	$X_{457}$	$X_{458}$	$X_{459}$	$X_{460}$	$X_{461}$	$X_{462}$	$X_{463}$	$X_{464}$	$X_{465}$	$X_{466}$	$X_{467}$	$X_{468}$	$X_{469}$	$X_{470}$	$X_{471}$	$X_{472}$	$X_{473}$	$X_{474}$	$X_{475}$	$X_{476}$	$X_{477}$	$X_{478}$	$X_{479}$	$X_{480}$	$X_{481}$	$X_{482}$	$X_{483}$	$X_{484}$	$X_{485}$	$X_{486}$	$X_{487}$	$X_{488}$	$X_{489}$	$X_{490}$	$X_{491}$	$X_{492}$	$X_{493}$	$X_{494}$	$X_{495}$	$X_{496}$	$X_{497}$	$X_{498}$	$X_{499}$	$X_{500}$	$X_{501}$	$X_{502}$	$X_{503}$	$X_{504}$	$X_{505}$	$X_{506}$	$X_{507}$	$X_{508}$	$X_{509}$	$X_{510}$	$X_{511}$	$X_{512}$	$X_{513}$	$X_{514}$	$X_{515}$	$X_{516}$	$X_{517}$	$X_{518}$	$X_{519}$	$X_{520}$	$X_{521}$	$X_{522}$	$X_{523}$	$X_{524}$	$X_{525}$	$X_{526}$	$X_{527}$	$X_{528}$	$X_{529}$	$X_{530}$	$X_{531}$	$X_{532}$	$X_{533}$	$X_{534}$	$X_{535}$	$X_{536}$	$X_{537}$	$X_{538}$	$X_{539}$	$X_{540}$	$X_{541}$	$X_{542}$	$X_{543}$	$X_{544}$	$X_{545}$	$X_{546}$	$X_{547}$	$X_{548}$	$X_{549}$	$X_{550}$	$X_{551}$	$X_{552}$	$X_{553}$	$X_{554}$	$X_{555}$	$X_{556}$	$X_{557}$	$X_{558}$	$X_{559}$	$X_{560}$	$X_{561}$	$X_{562}$	$X_{563}$	$X_{564}$	$X_{565}$	$X_{566}$	$X_{567}$	$X_{568}$	$X_{569}$	$X_{570}$	$X_{571}$	$X_{572}$	$X_{573}$	$X_{574}$	$X_{575}$	$X_{576}$	$X_{577}$	$X_{578}$	$X_{579}$	$X_{580}$	$X_{581}$	$X_{582}$	$X_{583}$	$X_{584}$	$X_{585}$	$X_{586}$	$X_{587}$	$X_{588}$	$X_{589}$	$X_{590}$	$X_{591}$	$X_{592}$	$X_{593}$	$X_{594}$	$X_{595}$	$X_{596}$	$X_{597}$	$X_{598}$	$X_{599}$	$X_{600}$	$X_{601}$	$X_{602}$	$X_{603}$	$X_{604}$	$X_{605}$	$X_{606}$	$X_{607}$	$X_{608}$	$X_{609}$	$X_{610}$	$X_{611}$	$X_{612}$	$X_{613}$	$X_{614}$	$X_{615}$	$X_{616}$	$X_{617}$	$X_{618}$	$X_{619}$	$X_{620}$	$X_{621}$	$X_{622}$	$X_{623}$	$X_{624}$	$X_{625}$	$X_{626}$	$X_{627}$	$X_{628}$	$X_{629}$	$X_{630}$	$X_{631}$	$X_{632}$	$X_{633}$	$X_{634}$	$X_{635}$	$X_{636}$	$X_{637}$	$X_{638}$	$X_{639}$	$X_{640}$	$X_{641}$	$X_{642}$	$X_{643}$	$X_{644}$	$X_{645}$	$X_{646}$	$X_{647}$	$X_{648}$	$X_{649}$	$X_{650}$	$X_{651}$	$X_{652}$	$X_{653}$	$X_{654}$	$X_{655}$	$X_{656}$	$X_{657}$	$X_{658}$	$X_{659}$	$X_{660}$	$X_{661}$	$X_{662}$	$X_{663}$	$X_{664}$	$X_{665}$	$X_{666}$	$X_{667}$	$X_{668}$	$X_{669}$	$X_{670}$	$X_{671}$	$X_{672}$	$X_{673}$	$X_{674}$	$X_{675}$	$X_{676}$	$X_{677}$	$X_{678}$	$X_{679}$	$X_{680}$	$X_{681}$	$X_{682}$	$X_{683}$	$X_{684}$	$X_{685}$	$X_{686}$	$X_{687}$	$X_{688}$	$X_{689}$	$X_{690}$	$X_{691}$	$X_{692}$	$X_{693}$	$X_{694}$	$X_{695}$	$X_{696}$	$X_{697}$	$X_{698}$	$X_{699}$	$X_{700}$	$X_{701}$	$X_{702}$	$X_{703}$	$X_{704}$	$X_{705}$	$X_{706}$	$X_{707}$	$X_{708}$	$X_{709}$	$X_{710}$	$X_{711}$	$X_{712}$	$X_{713}$	$X_{714}$	$X_{715}$	$X_{716}$	$X_{717}$	$X_{718}$	$X_{719}$	$X_{720}$	$X_{721}$	$X_{722}$	$X_{723}$	$X_{724}$	$X_{725}$	$X_{726}$	$X_{727}$	$X_{728}$	$X_{729}$	$X_{730}$	$X_{731}$	$X_{732}$	$X_{733}$	$X_{734}$	$X_{735}$	$X_{736}$	$X_{737}$	$X_{738}$	$X_{739}$	$X_{740}$	$X_{741}$	$X_{742}$	$X_{743}$	$X_{744}$	$X_{745}$	$X_{746}$	$X_{747}$	$X_{748}$	$X_{749}$	$X_{750}$	$X_{751}$	$X_{752}$	$X_{753}$	$X_{754}$	$X_{755}$	$X_{756}$	$X_{757}$	$X_{758}$	$X_{759}$	$X_{760}$	$X_{761}$	$X_{762}$	$X_{763}$	$X_{764}$	$X_{765}$	$X_{766}$	$X_{767}$	$X_{768}$	$X_{769}$	$X_{770}$	$X_{771}$	$X_{772}$	$X_{773}$	$X_{774}$	$X_{775}$	$X_{776}$	$X_{777}$	$X_{778}$	$X_{779}$	$X_{780}$	$X_{781}$	$X_{782}$	$X_{783}$	$X_{784}$	$X_{785}$	$X_{786}$	$X_{787}$	$X_{788}$	$X_{789}$	$X_{790}$	$X_{791}$	$X_{792}$	$X_{793}$	$X_{794}$	$X_{795}$	$X_{796}$	$X_{797}$	$X_{798}$	$X_{799}$	$X_{800}$	$X_{801}$	$X_{802}$	$X_{803}$	$X_{804}$	$X_{805}$	$X_{806}$	$X_{807}$	$X_{808}$	$X_{809}$	$X_{810}$	$X_{811}$	$X_{812}$	$X_{813}$	$X_{814}$	$X_{815}$	$X_{816}$	$X_{817}$	$X_{818}$	$X_{819}$	$X_{820}$	$X_{821}$	$X_{822}$	$X_{823}$	$X_{824}$	$X_{825}$	$X_{826}$	$X_{827}$	$X_{828}$	$X_{829}$	$X_{830}$	$X_{831}$	$X_{832}$	$X_{833}$	$X_{834}$	$X_{835}$	$X_{836}$	$X_{837}$	$X_{838}$	$X_{839}$	$X_{840}$	$X_{841}$	$X_{842}$	$X_{843}$	$X_{844}$

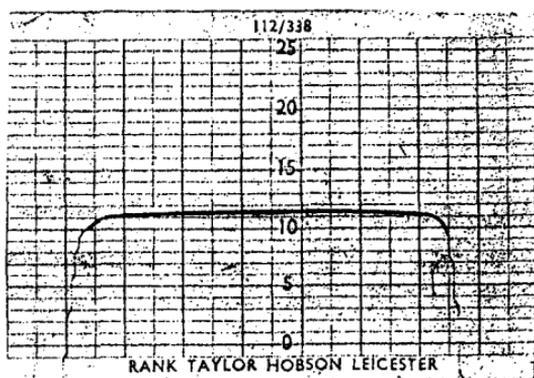




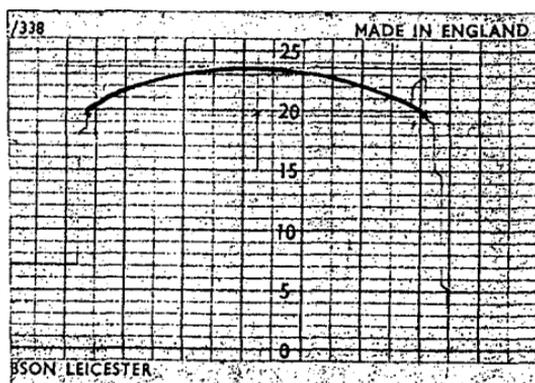
Круглограмма роликовой дорожки внутреннего кольца  
роlikоподшипника №2212 после ее шлифования:  
отклонение от круглости  $\Delta_{кр} = 1,49$  мкм, волнистость  $W_z = 1,1$  мкм,  
шероховатость  $R_a = 0,33$  мкм



Круглограмма роликовой дорожки внутреннего кольца роликоподшипника №2212 после многобрусковой доводки вращающимся инструментом: отклонение от круглости  $\Delta_{кр.} = 0.46$  мкм, волнистость  $W_z = 0.1$  мкм, шероховатость  $R_a = 0.10$  мкм



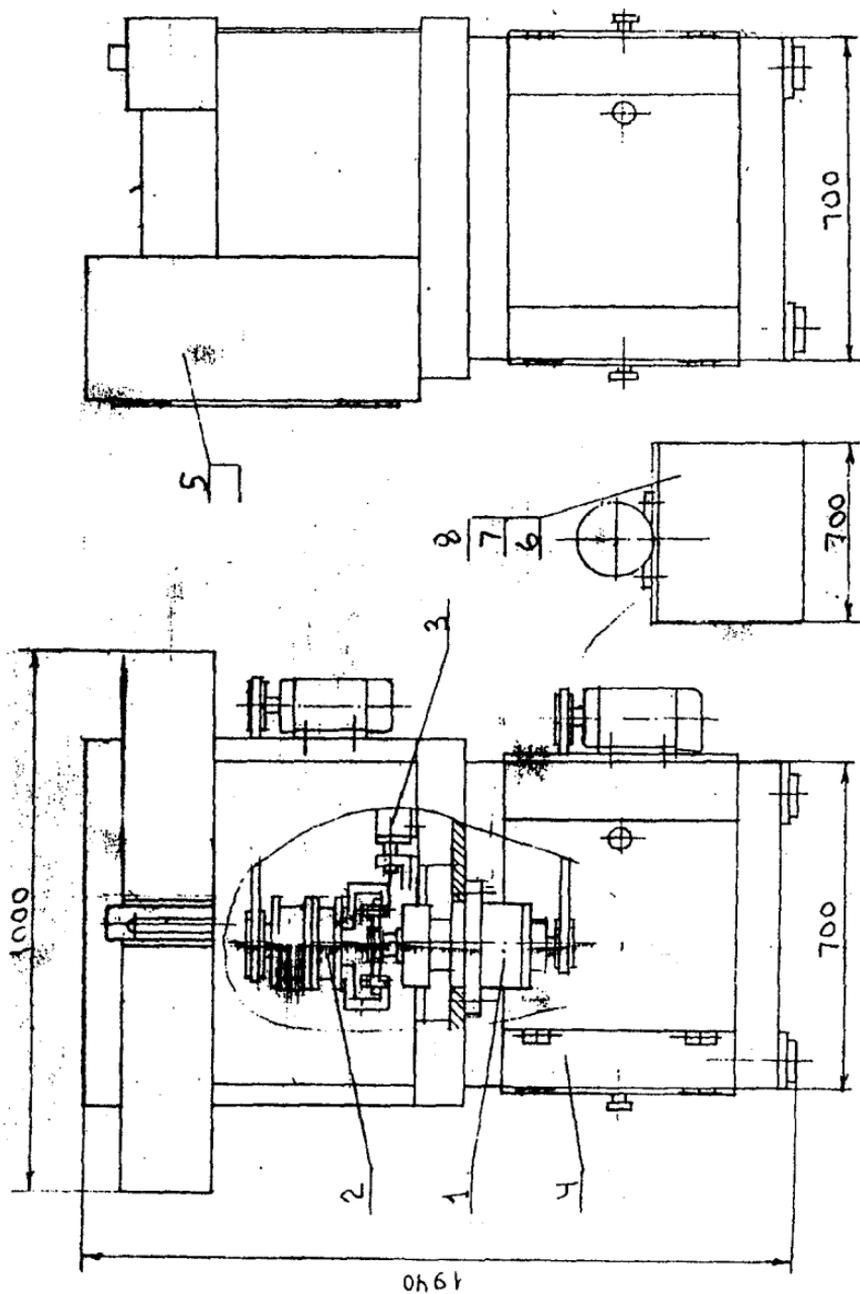
а)  $n_u=2900$  об/мин,  $n_r=120$  об/мин,  $P_6=8$  кг,  $\alpha=2^\circ$ ,  $T=6$  с



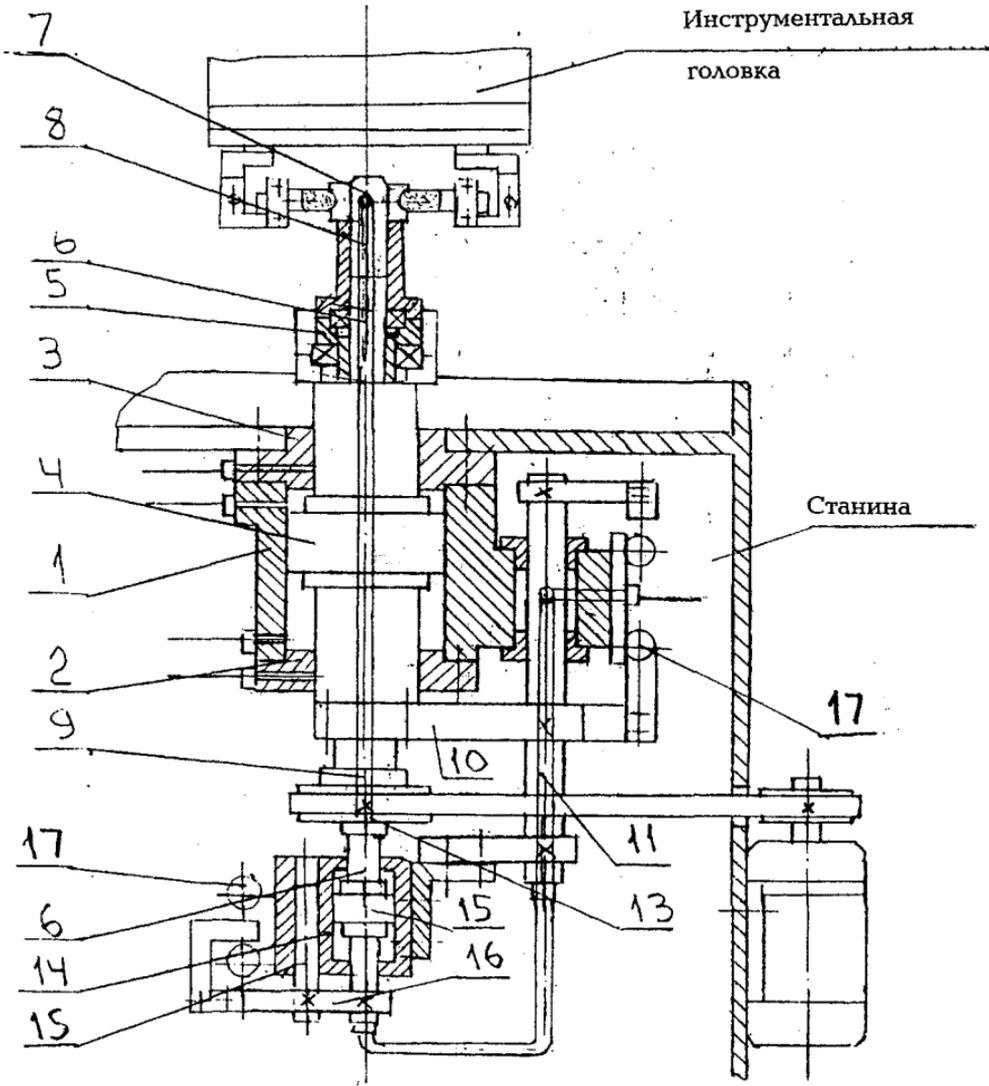
б)  $n_u=2900$  об/мин,  $n_r=120$  об/мин,  $P_6=8$  кг,  $\alpha=8^\circ$ ,  $T=6$  с

Профилограммы роликовой дорожки внутреннего кольца роликоподшипника №2212 после многобрусковой доводки вращающимся инструментом на автомате МДА-2500

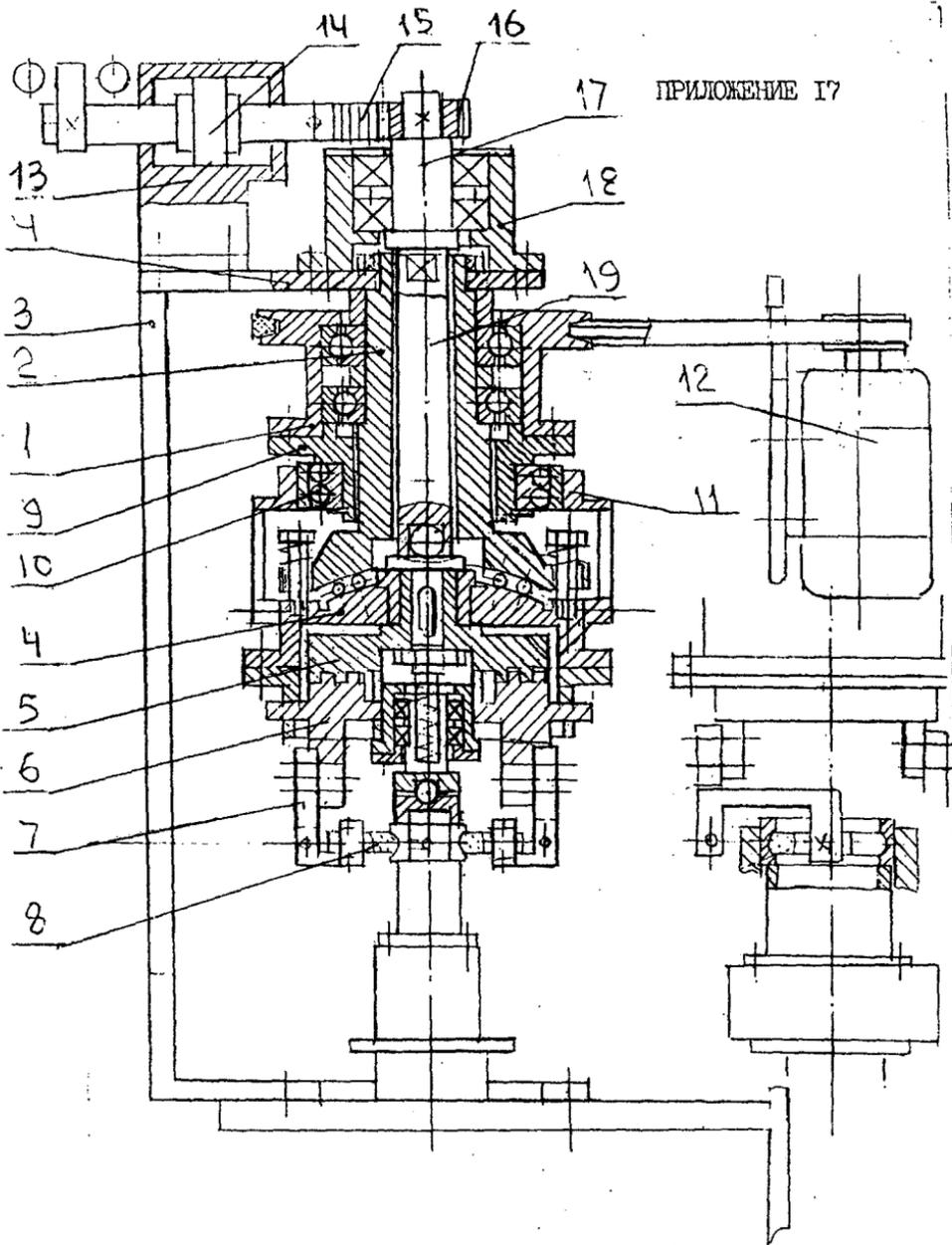




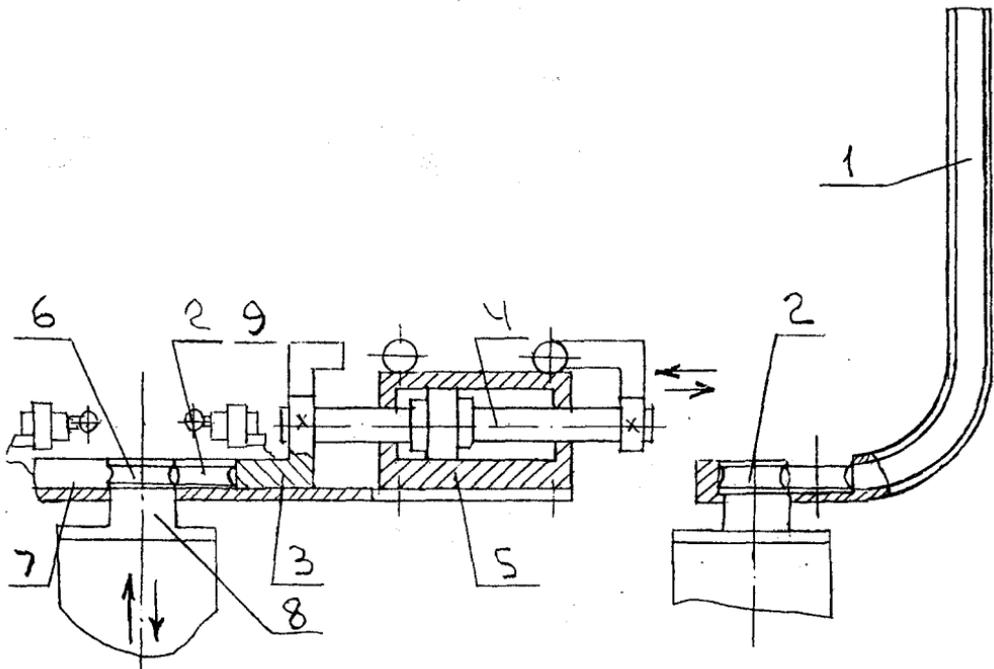
Расположение составных частей автомата ВДА-30В



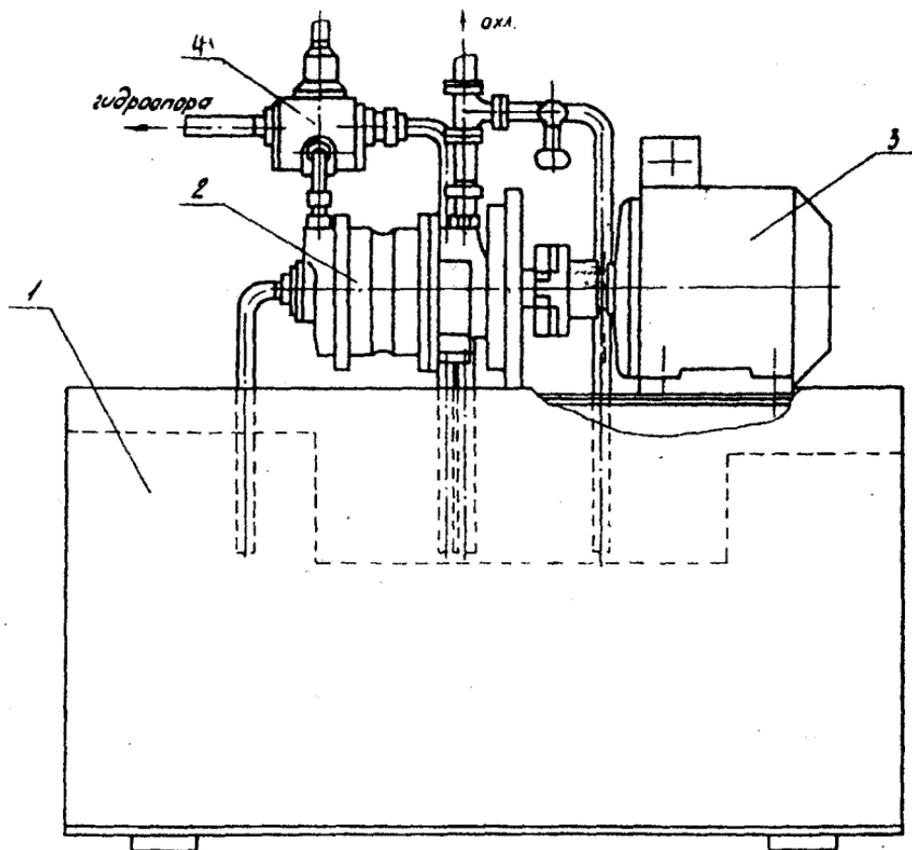
Бабка изделия автомата модели ВДА-30В для  
обработки внутренних колец



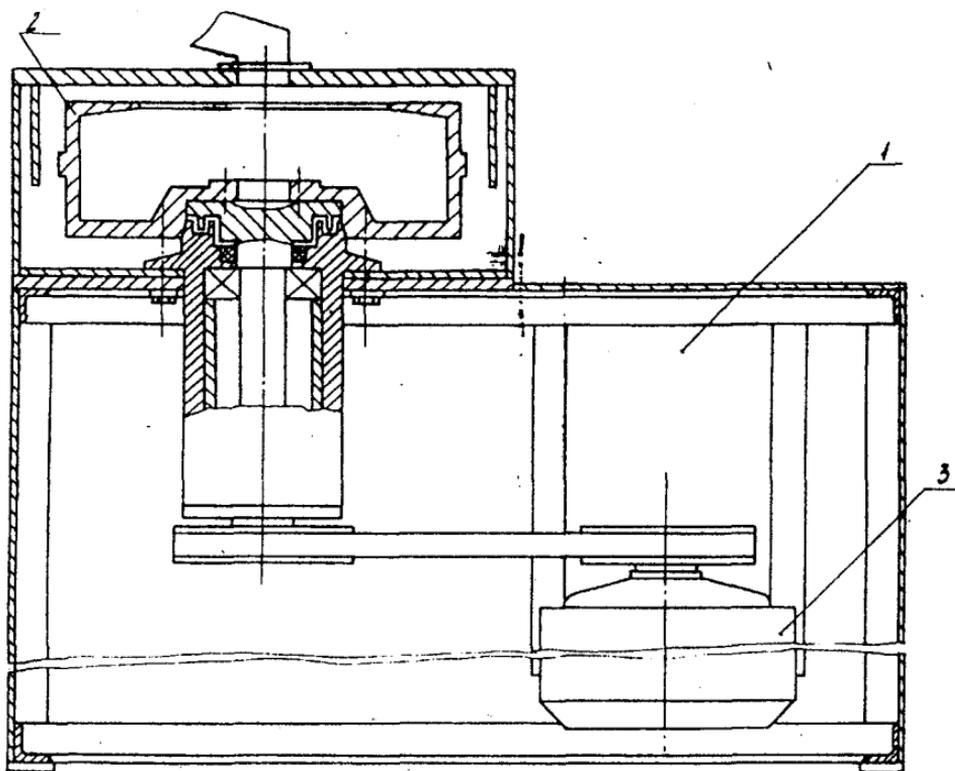
Инструментальная головка автомата модели ВДА  
для обработки внутренних и наружных колец



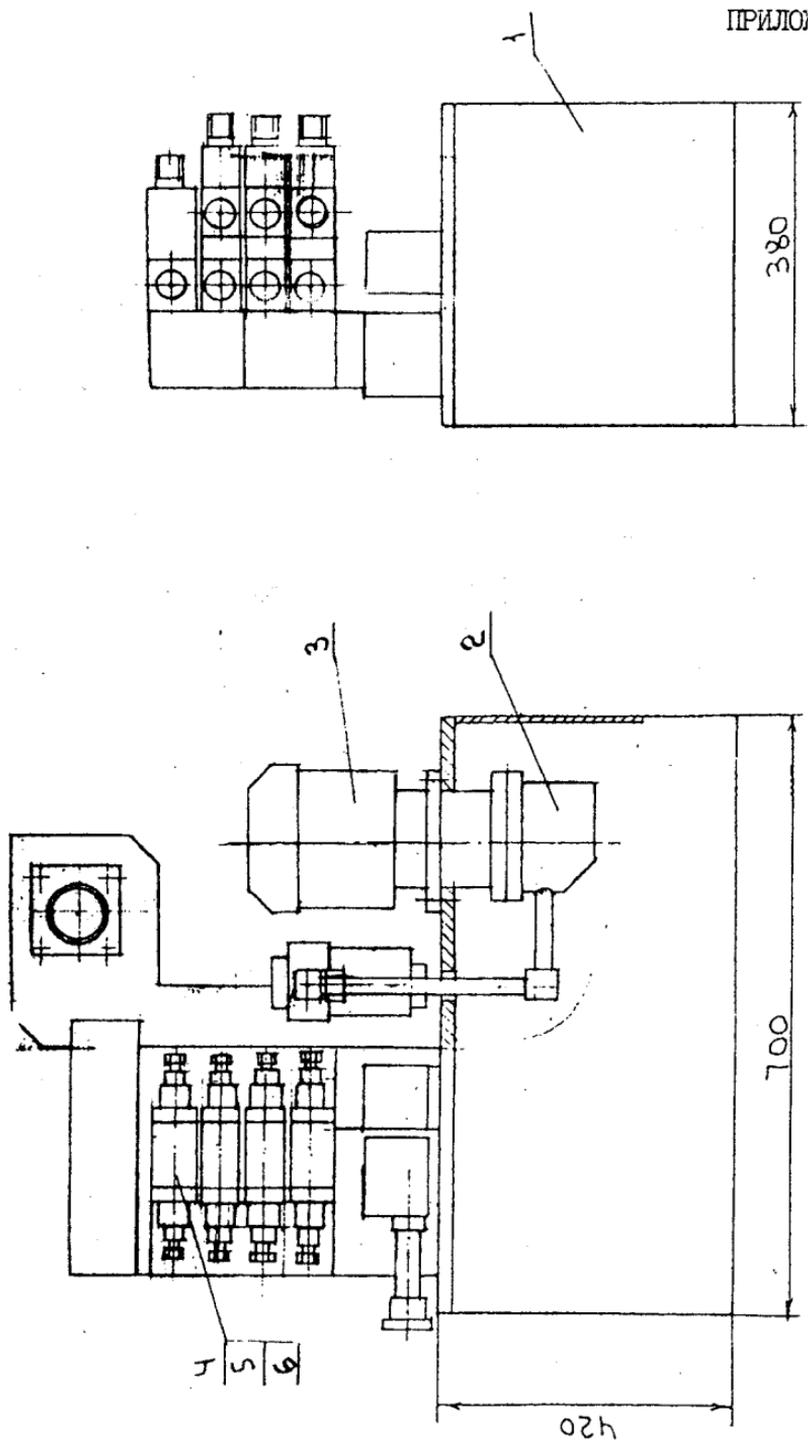
Механизм загрузки-выгрузки обрабатываемых колец  
/автооператор для наружных и внутренних колец/



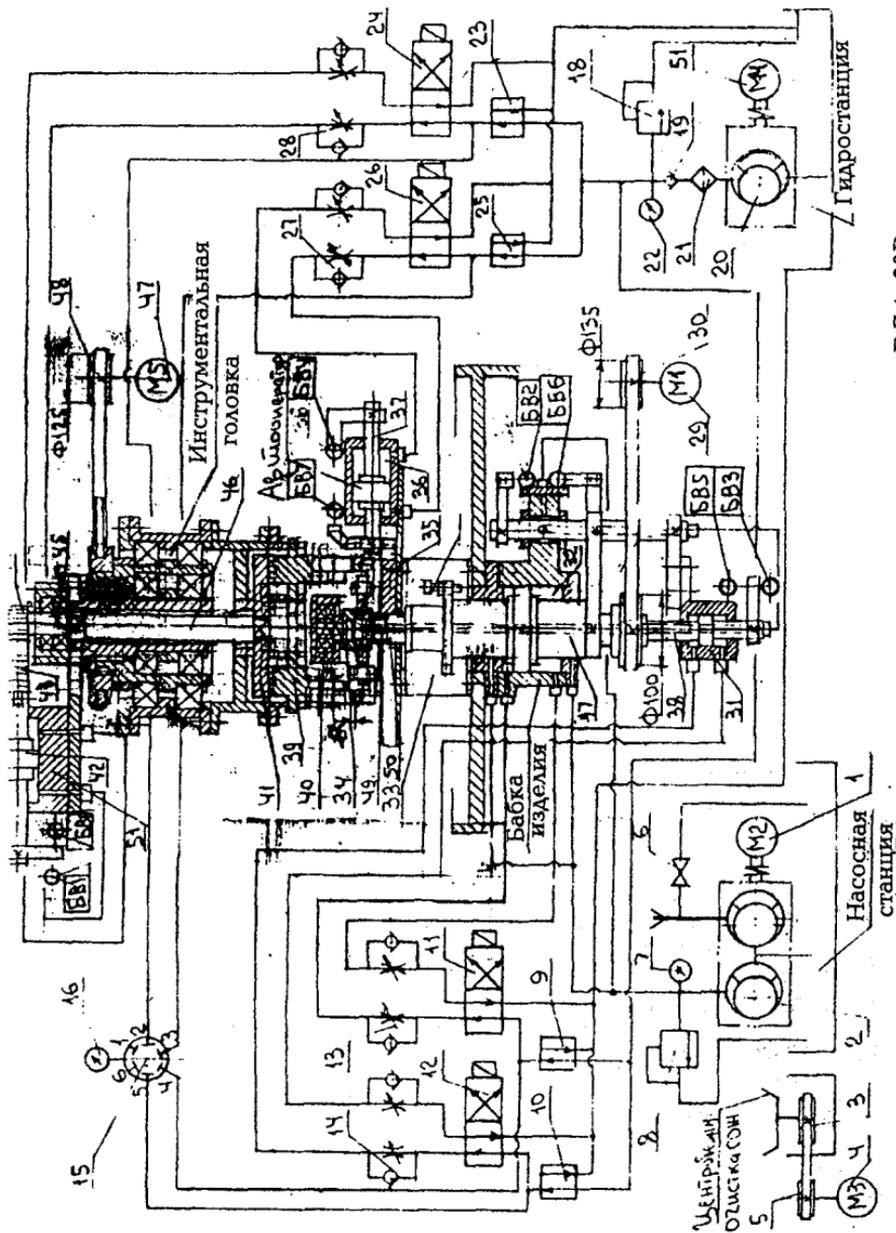
Насосная станция автомата ВДА-30В



Центробежная очистка СОЖ автомата ВДА-30В

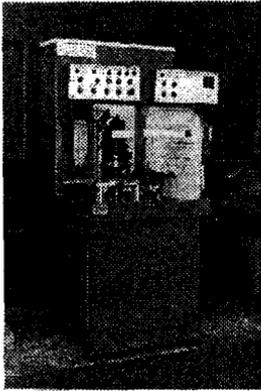


Гидростанция автомата ВДА-30В



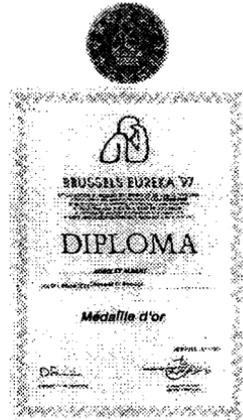
Гидрокинематическая схема автомата ВДА-30В

# Вертикальный многобрусковый суперфинишный автомат модели ВДА



**НАЗНАЧЕНИЕ:** Технологические операции суперфинишной обработки широкого спектра деталей, в том числе колец подшипников различных типов, коротких втулок, осей, шаровых поверхностей и т.д.

**ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:** Подшипниковое производство, автомобильная промышленность, станкостроение, производство двигателей, приборостроение, авиационная промышленность



Удостоен золотой медали на международной выставке в Брюсселе 1997г.

## КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА:

Диапазон размеров обрабатываемых деталей, мм.....	20-70
Класс точности подшипников.....	2-6
Количество позиций обработки, шт. ....	1
Производительность, шт./час .....	360
Рабочая жидкость гидросистемы ....	масло индустриальное И-5А ГОСТ 20799-75
Суммарная установленная мощность электродвигателей, кВт .....	5.5
Уровень шума, дБл .....	не более 85
Габаритные размеры автомата, мм .....	800×800×1900
Способ базирования .....	гидростатическое центрирование с прижимом по торцу обрабатываемого кольца

Цена, \$ (ориентировочная).....35 000

*В качестве примера ниже приведены результаты многобрускового суперфиниширования:*

*а) двухрядных колец подшипников 257907*

Наименование показателей	После шлифования	После суперфиниширования
Разноразмерность дорожек	4...6 мкм	4...6 мкм
Шероховатость $R_a$	0,58...0,63 мкм	0,16 мкм
Волнистость	0,25...0,30 мкм	0,03...0,05 мкм
Некруглость	2...4 мкм	1,5...2,5 мкм
Отклонение профиля	5...8 мкм	1,5...6,0 мкм

б) внутренних колец подшипников серии 204.

Наименование показателей	После шлифования	После суперфиниширования
Шероховатость $R_a$	0,58...0,63 мкм	0,08...0,16 мкм
Волнистость	0,25...0,30 мкм	0,10...0,05 мкм
Некруглость	2...4 мкм	1,5...2,5 мкм
Отклонение профиля	5...8 мкм	1,5...6,0 мкм

в) конических подшипников

Наименование показателей	Конус 1 <sup>0</sup>	Конус 4 <sup>0</sup>	Конус 7 <sup>0</sup>	Конус 11 <sup>0</sup>
Изменение угла конуса	+12"	-12"	+ 10"	-20 "
Непрямолнейность образ.: • до • после	-8 мкм +2 мкм	-10 мкм + 3 мкм	-11 мкм +1 мкм	-10 мкм +3 мкм
Шероховатость $R_a$ • до • после	0,5 мкм 0,08 мкм	0,7 мкм 0,10 мкм	0,6 мкм 0,10 мкм	0,5 мкм 0,12 мкм
Волнистость: • до • после	0,3 мкм 0,05 мкм	0,4 мкм 0,04 мкм	0,3 мкм 0,05 мкм	0,3 мкм 0,05 мкм
Некруглость: • до • после	1,0 мкм 0,55 мкм	1,2 мкм 0,60 мкм	1,1 мкм 0,55 мкм	1,0 мкм 0,55 мкм

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ:

В основу автомата заложена новая прогрессивная технология обработки многобрусковой суперфинишной головкой, совершающей плавное круговое движение вокруг точки симметрии вращающейся обрабатываемой поверхности детали.

ПРЕИМУЩЕСТВА:

1. Отсутствие высокочастотных знакопеременных движений инструмента, снижающих виброактивность технологической системы.
2. Высокая универсальность автомата, так как при простой переналадке он может использоваться для обработки внутренних, наружных, цилиндрических, сферических, со сложным профилем, конических и др. поверхностей деталей, в том числе колец двухрядных подшипников.
3. Возможность активного исправления не только волнистости и гранности, но и некруглости, овальности деталей, погрешностей формы профиля.
4. Возможность создания поверхности выпуклой формы в пределах 3-4 мкм. (например, на дорожках качения роликоподшипников).
5. Простота обслуживания: высокая стойкость инструмента, простота наладки.
6. Малые габариты, простота конструкции, низкая стоимость.
7. Низкая потребляемая энергия.

КОНТАКТНЫЕ РЕКВИЗИТЫ: Руководитель проекта - доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ Королев А.В. Менеджер проекта - Здоровец А.Г. 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.#Тел. (845-2) 50-48-84, 25-73-71. #Факс: (845-2) 50-49-49.# Телетайп: 241036 "Наука".

**Комплектовочный автомат и технология стохастического программного комплектования прецизионных изделий с локализацией объемов комплектуемых деталей**

**НАЗНАЧЕНИЕ:** Автомат предназначен для комплектования прецизионных сопряжений типа подшипников качения, узлов топливной аппаратуры, плунжерных пар и т.д.

**ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:** Подшипниковое производство, производство дизельных двигателей, двигателей внутреннего сгорания, самолетостроение, производство точных измерительных приборов и другие области точного машино- и приборостроения.

**КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА** (применительно к подшипникам качения):

Производительность, шт./час .....	1200
Размер колец, мм.....	до 60
Число разноразмерных тел качения .....	до трех
Габаритные размеры, мм .....	1000×1000×1500
Управление .....	автоматическое от ЭВМ
Потребляемая энергия.....	пневмосеть (4-5 атм.)
Цена (ориентировочная).....	60 000 \$

**ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ:**

1.Высокая комплектуемость деталей, так как комплектование осуществляется по методу индивидуального сопряжения деталей по технологии локализации объемов.

2.Простота конструкции, так как для комплектования подшипников не требуется предварительная сортировка деталей на группы размеров.

3.Низкие затраты энергии, так как автомат имеет всего один простой привод главного движения и несколько маломощных приводов исполнительных механизмов.

4.Высокая производительность, так как используется принцип параллельного комплектования колец.

5.Малые габаритные размеры, так как автомат имеет роторную схему работы со встроенными один в другой круглыми поворотными столами.

6.Управление автоматом осуществляется с помощью ЭВМ с использованием программ, разработанных на основе предлагаемой технологии.

**КОНТАКТНЫЕ РЕКВИЗИТЫ:** Руководитель проекта - доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ Королев А.В. Менеджер проекта - Здоровец А.Г. 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.#Тел. (845-2) 50-48-84, 25-73-71. #Факс: (845-2) 50-49-49.# Телетайп: 241036 "Наука".

**Автомат для высокоточной холодной раскатки деталей  
типа колец подшипников**

**НАЗНАЧЕНИЕ:** Автомат предназначен для холодной точной раскатки деталей типа колец подшипников, бомбинированных и конических роликов, тонкостенных массивных сепараторов и др. взамен токарной и предварительной шлифовальной обработки.

**Заготовка:** Штампованное кольцо или труба. При изготовлении фасонных или конических роликов заготовкой может служить пруток, но при этом операция раскатки совмещается с операцией отделения штучных заготовок ультразвуковым разломом деталей.

**ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:** Высокоточная заготовка деталей типа колец подшипников, роликов и т.д. с целью снижения припусков на шлифовальную обработку и повышения качества.

**КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА:**

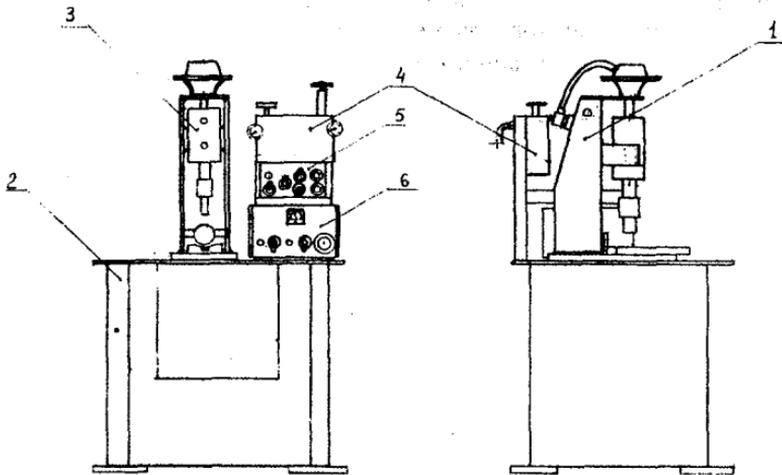
1. Производительность	- 1200шт./час;
2. Точность	- 8-6 квалитет;
3. Предельные размеры деталей или другие по спецзаказу	- 25x25 мм.;
4. Габаритные размеры автомата	- 1,2x1x0,7 м.;
5. Способ перемещения заготовки	- напроход;
6. Потребляемая мощность	- 1 квт.;
7. Уровень шума, дБл	- до 80;
8. Цена	- 22 000 \$.

**ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ:**

1. Простота конструкции и малые габаритные размеры, так как автомат не имеет мощных силовых механизмов, обычно присущих машинам такого рода.
2. Высокое качество обработки, так как раскатка осуществляется по принципу периодических микродеформаций поверхности заготовки.
3. Высокая стойкость валков, так как валки не имеют винтовой поверхности подобно станкам поперечно-винтовой прокатки.
4. Высокая размерная точность, так как оси валков неподвижны, рабочие поверхности валков занимают постоянное положение в пространстве.
5. Малые затраты энергии, так как раскатка осуществляется по принципу силового замыкания.

**КОНТАКТНЫЕ РЕКВИЗИТЫ:** Руководитель проекта - доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ Королев А.В. Менеджер проекта - Здоровец А.Г. 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77. #Тел. (845-2) 50-48-84, 25-73-71. #Факс: (845-2) 50-49-49. # Телетайп: 241036 "Наука"

## Полуавтомат для технологического разлома деталей типа колец шарнирных подшипников



- 1 - Стойка  
 2 - Подставка (стол)  
 3 - Ультразвуковая головка  
 4 - Пневмосистема  
 5 - Блок управления  
 6 - Ультразвуковой генератор

### КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Диаметры обрабатываемых колец, мм .....	10-75
Рабочая частота ультразвукового генератора, кГц .....	22±1,65
Усилие воздействия на деталь, Н .....	100-15000
Производительность, шт./час .....	до 900
Электропитание.....	220 В, 50 Гц
Пневмосеть - давление воздуха, атм. ....	5
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /час .....	1,5
Габариты, мм .....	900×700×1200
Цена, дол. США (ориентировочная).....	8.000

Более подробную информацию можно получить из актов приемных испытаний полуавтоматов, подписанных специалистами СПЗ, в которых отмечается высокое качество разлома колец, отсутствие брака по разлому, надежность работы.

Имеются образцы полуавтомата различного исполнения, в том числе вертикального и горизонтального и для различных типоразмеров колец.

**КОНТАКТНЫЕ РЕКВИЗИТЫ:** Руководитель проекта - доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ Королев А.В. Менеджер проекта - Здоровец А.Г. 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77. #Тел. (845-2) 50-48-84, 25-73-71. #Факс: (845-2) 50-49-49. # Телетайп: 241036 "Наука"

**Автомат для совмещенной размерной электрохимической и суперфинишной обработки деталей подшипников**

**НАЗНАЧЕНИЕ:** Автомат предназначен для окончательной размерной профильной обработки фасонных поверхностей деталей типа дорожек качения колец подшипников взамен двух технологических операций: чистового шлифования и суперфиниширования.

**ВЫПОЛНЯЕМЫЕ РАБОТЫ:** Размерная электрохимическая обработка, брусковое суперфиниширование. Возможна одновременная обработка двух дорожек колец двухрядных подшипников.

**КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА :**

1.Производительность .....	240шт./час;
2.Точность.....	6-5 квалитет;
3.Шероховатость Ra.....	до 0,04мкм.;
4.Волнистость Wz .....	до 0,05 мкм.;
5.Диаметр деталей .....	до 40 мм.;
6.Габаритные размеры .....	1x1x2 м.;
7.Потребляемая мощность .....	до 4 квт.;
8.Цена (ориентировочная).....	54 000 \$.

**ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ:**

1.Простота конструкции, так как автомат имеет простые по конструкции механизмы подачи, передаточные механизмы, механизмы управления и др.

2.Высокая производительность, так как обработка осуществляется одновременно несколькими инструментами и на одной операции совмещается чистовая и окончательная обработка.

3.Малые габаритные размеры, так как автомат имеет компактную компоновку узлов.

4.Возможна одновременная обработка двух дорожек колец подшипников с обеспечением высокой однородности поверхностей.

5.Простота обслуживания, так как инструмент практически не изнашивается, обеспечивает одинаковую форму профиля деталей.

**КОНТАКТНЫЕ РЕКВИЗИТЫ:** Руководитель проекта - доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ Королев А.В. Менеджер проекта - Здоровец А.Г. 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.#Тел. (845-2) 50-48-84, 25-73-71. #Факс: (845-2) 50-49-49.# Телетайп: 241036 "Наука".

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корьячев А.Н., Лысанов Л.Г., Митрофанов В.Г. Суперфиниширование желобов колец подшипников способом винтовой осцилляции.- М.: Машиностроение, 1983.-49с.
2. Das Langhubhonen ein modernes Feinbearbeitungsverfahren/Werkzeug und Werkstückmaschine.-1989. №1.-S.18-28.
3. Патент 2033915, Россия, В24В 33/08. Хонинговальная головка/ Б.Н. Вайштейн, Н.Г. Желобов.// Открытия. Изобретения.1995.- №12.
4. Патент 5361544, США, В24В 7/00. Способ абразивной обработки.- 1994.-НКИ 454/231.
5. Патент 5371978, США, В24В 9/02. Хонинговальный инструмент.- 1994.-НКИ 451/51.
6. Патент 1396431, Россия, В23Q 15/00. Способ хонингования наружных поверхностей/С.П. Алимов, Л.А. Гринглаз и др.// Открытия. Изобретения.1995.-№ 29.
7. Патент 2033916, Россия, В24В 35/00. Станок для суперфинишной обработки колец/ В.А. Максимов, А.И. Куклин и др.// Открытия. Изобретения.1995.- №12.
8. Weltpremiere von Superfinishing Mashinen and Verfahren // Fertigung.- 1994.-22, № 7-8.-S.46-48.
9. Степанов К.В. Повышение эффективности суперфиниширования колец подшипников // Исследование станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей: Сб.науч.тр.- Саратов, 1994.- С.39-44.
10. Патент 2049652, Россия, В24В 35/00. Способ суперфинишной обработки/А.В. Воронцов // Открытия. Изобретения. 1995.- №34.
11. Повышение эффективности процесса хонингования путем его оптимизации и применения нового абразивного инструмента без связки /

В.М. Оробинский, А.И. Курченко и др.// Актуальные проблемы машиностроения на современном этапе: Тез.докл.Всерос.науч.техн.конф./ Владим.техн.ун-т.-Владимир, 1995. С.8-9.

12. Теоретическое определение величины износа абразивных брусков ВО при хонинговании / В.М. Оробинский, А.И. Курченко и др. - Волгогр.гос.техн.ун-т.- Волгоград. Деп. в ВИНТИ 5.5.95 № 1245 - В95. - 1995.-7 с.

13. Повышение эффективности процесса хонингования / В.М. Оробинский, В.К. Шаповал, Л.Г. Гильдебранд // СТИН.- 1995. № 3. - С. 22-23.

14. Суперфиниширование роликов подшипников новым абразивным инструментом без связки /В.М. Оробинский, А.И. Банников, Ю.Н. Полянчиков // Межвуз.сб.науч.тр./ Пенз.гос.техн.ун-т.- 1994. - №21. - С. 52-57.

15. Патент 2053100, Россия, В24В 19/06. Способ чистовой обработки / А.В. Королев и др.// Открытия. Изобретения. 1996.- №3.

16. Испытания суперфинишных автоматов МДА-92 на технологическую надежность / А.В. Королев и др. // СТИН.-1995.-№3.-С.7-9.

17. Патент 2024385, Россия, В24В 35/00. Способ абразивной обработки/ А.В. Королев, П.Я. Коротков и др. // Открытия. Изобретения. 1994.- № 23.

18. Королев А.А. Рациональные условия многобрусковой доводки деталей подшипников//Межвуз.сб.науч.тр./Пенз.гос.техн.ун-т.-1994.-№ 21.-С.141-147.

19. Патент 2036773, Россия, В24В 19/06. Устройство для абразивной обработки/А.В. Королев, П.Я. Коротков и др.// Открытия. Изобретения. 1995.- № 16.

20. А.с. 1809799, СССР, В24В 1/00. Способ абразивной обработки поверхностей вращения / А.Н. Филин, В.Г. Рахчев и др. // Открытия. Изобретения. 1993.- № 14.

21. А.с. 1824289, СССР, В24В 5/42. Способ суперфиниширования валов / И.В. Овсянников // Открытия. Изобретения. 1993.-№ 24.

22. Hohe Frequenzhohes Niveau // Produktion.-1996.-№ 3.-P.12.

23. Honen mit hoher Frequenz //Ind.-Anz.-1995.-117, № 46, 47.-P.27.

24. Superfinishing // Tool. and Prod.-1996.-62, №2.-P.106.

25. Metal removal with centerless microfinishing // Amer. Mach.-1996.-140, № 4.-P.178.

26. Repeatable, fast finishes //Mod. Mach. Shop.- 1994.-67, №6.- P.250.

27. Honmaschine ist vielseitig und laßt sich einfach bedienen // Maschinenmarkt.-1995.-101, №11.-S.155.

28. Honing machine // Tool. and Prod.- 1994.-60, №5.-P.180.

29. Chaotic characteristics of ent surface texture / Hasegawa Motoyosti, Liu Jiancheng, Ohuda Koichi, Nunobiki Masayuki // Jnt.J. Jap. Soc. Precis. Eng.-1994.-28, №4.-P.45-46.

30. Прогрессивный инструмент для хонингования глубоких отверстий / В.А. Бахвалов, Е.А. Паненко // Машиностроитель.- 1995.- №2.- С.12.

31. Levegatrice veloce // Riv. mecc. -1994. -45, № 1064.-P.94

32. Self-aligning toll // Amer. Mach:- 1995. -139, № 4. -P.186.

33. Influence of the working pressure on the amplitude of the grinding stone movement in a pneumatic superfinishing device / Budei Radu, Budei Luminifa, Jonsescu Romeo // Bul. Inst. politehn.Jasi,Sec. 5. -1994. -40, № 1.-4.-P.87-94.

34. Hochfrequenzhonen: mit Ultraschall zur Prazision / Wes. kamper E.,Kappmeger G.// WT Prod. und Manag. -1995. -85, № 5.-S.215-218

35. Rodatrici Jappatrici // Riv. mecc. -1993. -44, № 1030.- P.128

36. Патент 4143262, ФРГ, В23В 33/08. Хонинговальный брусок//Открытия.Изобретения.-1993.-НКИ 6421930.
37. Патент 301308, ФРГ, В24В 19/06. Способ и устройство для суперфиниширования колец подшипников//Открытия. Изобретения.-1992.-НКИ 3411830.
38. Патент 5158636, США, В24В 21/00. Устройство для микрофинишной обработки крупных деталей//Открытия. Изобретения.-1992.- НКИ 51/142.
39. Nonen mit Schwingungsüberlagerung//WT Prod. and Manag.-1993.-83, №6.-С.67.
40. Bohrungen rasch and qluan schleifen//Werkstatt and Betr.- 1993.-126, №3.-Р.146.
41. Патент 2005055, Россия, В24В 33/08. Хонинговальная головка/В.А. Бахвалов //Открытия. Изобретения.-1993.- № 47-48.
42. Microfinishing machine improves part geometry // Amer. Mach.-1993.-137, №9.-Р.70-71.
43. А.с. 1818207, СССР, В24В 35/00. Способ суперфинишной обработки/В.Г. Самаринов, Г.Л. Амитан, И.Д. Гебель и др//Открытия. Изобретения.-1993.-№20.
44. А.с. 1833298, СССР, В24В 33/08. Хонинговальная головка/ А.А. Ягуткин, А.И. Акилов, В.Н. Петренко //Открытия. Изобретения.-1993.-№29.
45. Патент 2053104, Россия, В24В 33/08. Инструмент для обработки абразивными брусками / В.Б. Четаев, В.А. Ахматов, В.А. Прилуцкий// Открытия. Изобретения.- 1995.- №23.
46. Патент 2028913, Россия, В24В 33/02. Способ обработки поверхностей вращения и инструмент для его осуществления / В.А. Прилуцкий //Открытия. Изобретения.- 1995.-№5.

47. Патент 2049651, Россия, В24В 33/02. Способ абразивной обработки / В.А. Прилуцкий и др. //Открытия. Изобретения.- 1995.-№34.

48. Способы обработки поверхностей вращения брусками/ В.А. Ахматов, Н.В. Анянко, В.А. Прилуцкий и др. // Вестн. машиностр.- 1995, №9.- С.37-39.

49. Давиденко О.Ю., Королев А.В. Подшипник качения с повышенными эксплуатационными параметрами // Информ.листок / ЦНТИ.-Саратов, 1986.-3с.

50. Давиденко О.Ю. Стендовые испытания на долговечность роликоподшипников с профилированной поверхностью способом многобрускового суперфиниширования дорожки качения // Чистовая обработка деталей машин: Сб.тр.-Саратов, 1986.-С.47-55.

51. Повышение долговечности и грузоподъемности роликовых подшипников за счет оптимизации профиля дорожки качения / А.В. Королев, О.Ю. Давиденко и др.: Отчет о НИР, №01830050612.-Саратов, 1986.-191с.

52. Давиденко О.Ю. Повышение эффективности и качества доводки дорожек качения роликоподшипников применением многобрускового суперфиниширования: Дис. ...канд.техн.наук: 05.02.08.-Саратов,1986.-218 с.

53. Давиденко О.Ю., Королев А.В. Повышение работоспособности опор качения путем рационального профилирования рабочих поверхностей их деталей //Обеспечение надежности узлов трения машин: Сб.тез.докл.Всесоюз.конф. -Ворошиловград, 1988.-С.79.

54. Разработка теории упругого взаимодействия сложнопрофильных тел / А.В. Королев, О.Ю. Давиденко и др.: Отчет о НИР, №01880034899.-Саратов, 1988.-57 с.

55. Разработка оптимальных конструкций опор качения с повышенными эксплуатационными и технологическими показателями /

А.В. Королев, О.Ю. Давиденко: Отчет о НИР №01880034899.-Саратов, 1989.-36с.

56. Разработка теории прецизионного формообразования рабочих поверхностей деталей опор качения /А.В. Королев, О.Ю. Давиденко: Отчет о НИР № 01880034899.-1990.-34с.

57. А.с. № 1764386, СССР, F16C 19/06. Роликовый подшипник/О.Ю. Давиденко, А.В. Королев, Д.Г. Евсеев, А.Л. Черневский //Открытия. Изобретения.-1992.

58. А.с. № 1732032, СССР, F16C 19/06. Роликовый подшипник/А.В. Королев, О.Ю. Давиденко// Открытия. Изобретения.-1992.- № 17.-3с.

59. Спицына И.Н. Несущая способность опор качения с бомбинированными роликами //Надежность и контроль качества.-1986.- №3.-С.43-46.

60. Спицына И.Н. Допустимые нагрузки на цилиндрические и бомбинированные ролики опорно-поворотных устройств // Труды НПО ВНИПП.-1986.-№2.-С.77-82.

61. Производство подшипников за рубежом - конструирование, технология, новые материалы, конъюнктура рынка (ежегодник)//Серия X - Подшипниковая промышленность /ЦНИИТЭИ Автопром.- М.,1990.-67с.

62. Коросташевский Р.В. Применение подшипников качения при высоких частотах вращения (обзор) //Серия X - Подшипниковая промышленность /ЦНИИТЭИ Автопром.- М., 1989.-68с.

63. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. - М.: Наука, 1965. - 340 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. МНОГОбРУСКОВОЕ СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ПЕРЕСЕЧЕНИЕМ ОСЕЙ ВРАЩЕНИЯ ЗАГОТОВКИ</b> .....	5
1.1. Кинематика перемещения инструмента .....	5
1.2. Формообразование профиля обрабатываемой поверхности.....	12
1.3. Влияние технологических факторов профилирующей доводки на выходные параметры обработки.....	20
1.4. Технологическое оборудование и условия проведения экспериментальных исследований.....	23
1.5. Экспериментальные исследования влияния условий обработки на ее производительность и точностные показатели.....	34
<b>2. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРОФИЛЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ НА ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ</b> .....	54
2.1. Обоснование рациональной геометрической формы профиля дорожек качения колец подшипников .....	54
2.2. Объект и условия проведения стендовых испытаний, измерительные приборы и оборудование .....	71
2.3. Методика проведения испытаний и обработки экспериментальных данных.....	75
2.4. Исследования влияния конструктивных особенностей роликовых подшипников на их долговечность.....	81
<b>3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МНОГОбРУСКОВОГО СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ</b> .....	91

3.1 Технологические возможности многобрусковой абразивной обработки .....	91
3.2. Промышленная реализация результатов выполненных исследований .....	105
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	116
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	117
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	145

