

М232610  
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское  
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

---

КУЛЕШОВА Зинаида Григорьевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМЫ ДЕТАЛЕЙ  
ТИПА ГИЛЬЗ И КОЛЕЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ  
ЗАКРЕПЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ И СБОРКИ

(05.02.08 — Технология машиностроения)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



1232610

Кулешова З.Г. Исследования

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана.

Научные руководители:  
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,  
доктор технических наук, профессор Корсаков В. С.,  
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,  
доктор технических наук, профессор Пономарев С. Д.

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор Колесов И. М.,  
кандидат технических наук, доцент Бояршинов С. В.

Ведущее предприятие — Оргстанкинпром.

Автореферат разослан «      »

1974 г.

Защита диссертации  
на заседании Совета факультета  
«Производство» МВТУ  
Москва, 107005, 2-я Бауманская

Ваши отзывы на автореферат,  
претензии к нему, просим направлять

С диссертацией можно ознакомиться  
в библиотеке МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Секретарь ученого совета  
канд. техн. наук, доцент

М232610

В Программе Коммунистической Партии Советского Союза отмечено: "Систематическое повышение качества продукции является обязательным требованием развития экономики. Качество продукции советских предприятий должно быть значительно выше, чем на лучших, капиталистических предприятиях".

Качество изделия, надежность его работы, тесно связаны с точностью формы основных элементов машин. Отклонения формы, возникающие при изготовлении, как правило, увеличиваются в процессе эксплуатации. Это заставляет особенно тщательно исследовать причины, вызывающие появление погрешностей формы деталей.

Решением данной проблемы занимались как советские, так и зарубежные ученые: Ш.М.Билик, В.С. Корсаков, *G. Pahlitzsch*, *H.-J. Warnecke* и др. Однако большинство имеющихся работ основано на приближенных представлениях о характере деформации деталей, а результаты этих работ применимы только для сравнительно узкого круга изделий.

Настоящая работа посвящена разработке методики определения погрешностей формы деталей типа гильз и колец на основе более точных зависимостей прикладной теории упругости

Диссертация состоит из введения и четырех глав.

Во введении сформулированы задачи настоящей работы и намечены пути их решения.

В первой главе исследованы причины возникновения погрешностей формы деталей типа гильз и колец. Приведен краткий обзор отечественной и зарубежной литературы по данному вопросу, а также дан анализ применяемых на машиностроительных заводах современных расчетных и экспериментальных методов определения отклонений формы деталей. Высокоточные детали обрабатываются на финишных операциях на "мягких" режимах с последующим выхаживанием. В этом случае основным фактором, от которого зависит точность геометрической формы и взаимное расположение поверхностей детали, будет деформация заготовки под действием сил закрепления при механической обработке. При снятии усилий закрепления эти деформации исчезают, что приводит к искажению правильной формы обработанной поверхности. Погрешности, возникающие под действием сил закрепления вполне соизмеримы, а в некоторых случаях превосходят допуски на отклонения формы.

Вторая глава посвящена разработке методов расчета погрешностей формы деталей типа гильз и колец.

Кольцо может быть как самостоятельной деталью, так и частью более сложной детали, например гильзы. В последнем случае для составления уравнений сопряжения кольца с цилиндрической час-

1222610

тью гильзы, необходимо решение задачи о деформации кольца представить в рядах. Нагрузка на кольцо в этом случае также раскладывается в ряды. В работе получены общие формулы для определения радиальных  $W$ , окружных  $V$ , осевых  $U$  и угловых  $\vartheta$  перемещений в зависимости от коэффициентов разложения нагрузки в ряды.

При исследовании пространственных отклонений формы деталей типа гильз использована теория осесимметричной деформации цилиндрических оболочек и полубезмоментная теория несимметричной деформации В.З.Власова.

Разрешающее уравнение теории осесимметричной деформации цилиндрической оболочки имеет вид:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{p_1}{D} - \frac{\mu N_x}{D\tau}, \quad (1)$$

где  $\beta_0 = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{\tau^2 h^2}}$ ;  $D = \frac{Eh^3}{3(1-\mu^2)}$ ;  $p_1$  - радиальное давление, приведенное к срединной поверхности;  $N_x$  - осевая сила, приходящаяся на единицу длины дуги окружности;  $\tau, h$  - толщина стенки и радиус срединной поверхности;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $E$  - модуль упругости.

Для достаточно длинных оболочек, удовлетворяющих условию  $\beta_0 \ell > 3$ , решение уравнения (1) принято в следующей форме:

$$w_0 = e^{-\beta_0 x} (C_1 \cos \beta_0 x + C_2 \sin \beta_0 x) + \frac{p_1 \tau^2}{Eh} - \frac{\mu N_x \tau}{Eh}, \quad (2)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  - постоянные интегрирования, а для оболочек средней длины ( $0,5 < \beta_0 \ell < 3$ ) решение представлено в функциях А.Н.Крылова:

$$w_0 = A_1 K_1(\beta_0 x) + A_2 K_2(\beta_0 x) + A_3 K_3(\beta_0 x) + A_4 K_4(\beta_0 x) + \frac{p_1 \tau^2}{Eh} - \frac{\mu N_x \tau}{Eh}. \quad (3)$$

По уравнениям теории осесимметричной деформации цилиндрической оболочки решаются многие задачи о деформациях обрабатываемых заготовок, а также и деталей самих станков. В частности во второй главе диссертации решены следующие задачи:

1. Определение деформации гильзы закрепляемой по торцам.
2. Исследована деформация ступенчатой гильзы, закрепленной для механической обработки осесимметричной радиальной нагрузкой.
3. Исследование влияния положения зажимного усилия на деформацию гильзы, подкрепленной по краю кольцом.
4. Определение деформаций, возникающих в сопрягаемых деталях в процессе сборки прецизионных узлов.

Анализ деформации гильзы при ее закреплении по торцам показал, что форма деформированной образующей описывается уравнением:

для коротких гильз  $w = \frac{p_1 \mu}{2\pi E h} [1 - K_1(\beta_0 x) + a_2(x) K_1(\beta_0 x) - a_4(x) K_4(\beta_0 x)],$

для длинных гильз  $w = \frac{p_1 \mu}{2\pi E h} (1 - e^{-\beta_0 x} \cos \beta_0 x).$

Для коэффициентов  $\alpha_i(x_i)$  и  $\alpha_i(y_i)$ , зависящих от безразмерной длины гильзы  $x_0 = y_0 \ell$  составлены графики и даны аналитические зависимости.

В задачах второго типа (когда гильза имеет участков) что-бы не определять большого количества постоянных интегрирования, применен метод начальных параметров.

С помощью полученных зависимостей, связывающих радиальные перемещения с величиной нагрузки, можно по допуску на отклонение формы детали определить допустимые удельные нагрузки в месте ее закрепления. По этим нагрузкам определяются силы закрепления и зажимное устройство. Можно также решать обратную задачу. По моменту, создаваемому силами резания, определить величину контактных сил и по этим силам найти фактическое отклонение формы.

Для распространенного в практике случая, когда гильза закрепляется для обработки в двух сечениях и когда жесткость оправки на порядок меньше жесткости гильзы, крутящий момент на заготовку передается, в основном, со стороны планшайбы. Поэтому гильзу целесообразно закреплять так, чтобы более жесткий ее конец находился по стороны шпинделя. Так например для одной из рассчитанных гильз при закреплении ее указанным способом нецилиндричность составила 0,52 мкм, а при закреплении той же гильзы более тонким концом к планшайбе погрешность возрастет до 1,66 мкм, т.е. более, чем в три раза. Следовательно конструкция оправки должна гарантировать подвод мощности от шпинделя к центральной оправке только со стороны более жесткого конца гильзы.

Посадочные поверхности деталей, состоящих из цилиндрических оболочек, подкрепленных по краю упругим кольцом, обычно шлифуют на специальной разжимной оправке. В работе показано, как надо выбрать места закрепления гильзы, чтобы на длине посадочной поверхности погрешность формы практически отсутствовала. Погрешность же размера посадочной поверхности гильзы может быть компенсирована при настройке станка.

Во второй части второй главы рассмотрены задачи о несимметричной деформации цилиндрических деталей. При произвольном законе распределения нагрузки отклонения формы зависят от двух координат: от линейной координаты  $x$  и от угловой координаты  $\varphi$ . Для определения деформации гильз в этом случае используется полубезмоментная теория В.З.Власова. За искомую функцию принято окружное смещение  $V = V(x, \varphi)$ . В этом случае для гильзы с постоянной толщиной стенки разрешающее уравнение полубезмоментной теории

имеет вид:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{h^2}{12 z^4} \Omega \Omega (v) = - \frac{1}{Eh} P(x, \varphi), \quad (4)$$

где  $\Omega = \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} (1 + \frac{\partial^2}{\partial x^2})$  - дифференциальный оператор;

$P(x, \varphi) = \frac{\partial^3 p_1}{z^2 \partial x^3} + \frac{\partial^2 p_2}{z^2 \partial \varphi^2} - \frac{\partial^2 p_3}{z \partial x \partial \varphi}$  - функция нагрузки;

$p_1$ ;  $p_2$ ;  $p_3$  - соответственно радиальная, окружная и осевая поверхностные нагрузки.

При отсутствии поверхностной нагрузки разрешающее уравнение будет однородным. Нагрузка на гильзу может состоять из сосредоточенных и распределенных сил, приложенных к торцам гильзы или к некоторому поперечному сечению. В последнем случае придется рассматривать два и более участков. Поскольку сосредоточенные нагрузки непосредственно в уравнение (4) не входят, они учитываются в граничных условиях на торцах или в условиях опирания участков. Решение дифференциального уравнения ищется в рядах вида  $V(x, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(x) \sin n\varphi$ . Коэффициенты ряда зависят от  $x$  и определяются из уравнений, аналогичных уравнению осесимметричной деформации цилиндрической оболочки (I).

По полубезмоментной теории был решен целый ряд задач, представляющих большой практический интерес. Одной из таких задач является задача о деформировании гильзы приспособлением, имеющим  $k$  зажимных элементов. Такие приспособления широко применяются для закрепления деталей при обработке и сборке. К ним относятся кулачковые, цанговые, мембранные патроны и ряд других. В работе рассмотрена гильза постоянной толщины, закрепленная на произвольном расстоянии  $l_1$  ( $l_2$ ) от торца в  $k$  - кулачковом патроне. Действие кулачков на гильзу заменено  $k$  сосредоточенными силами  $P_k$ , расположенными под углом  $\alpha = \frac{2\pi}{k}$  друг к другу. Внешняя нагрузка представлена в виде ряда:

$$q = \frac{P_k \cdot k}{2\pi z} + \frac{P_k \cdot k}{\pi z} \sum_{n=k, 2k, 3k} \cos n\varphi.$$

Для двух участков ( $i = 1, 2$ ), расположенных по разные стороны от плоскости действия сил  $P_k$  (плоскость  $x = 0$ ) найдены функции радиальных, угловых и осевых перемещений:

$$w_i(z, \varphi) = \sum_{n=k, 2k, 3k} w_i^n(z) \cos n\varphi; \quad \psi_i(z, \varphi) = \sum_{n=k, 2k, 3k} \psi_i^n(z) \cos n\varphi; \quad u_i(z, \varphi) = \sum_{n=k, 2k, 3k} u_i^n(z) \cos n\varphi, \quad (5)$$

где  $z = x/z$ ;  $z_1 = l_1/z$ ;  $z_2 = l_2/z$ ;  $\gamma_n = \sqrt{\frac{n^4(n^2-1)\delta^2}{48}}$ ;  $\delta = h/z$ ;  $\delta_i^n = \gamma_n z_i$ .

В зависимости от длины участка  $\gamma_n z_i$  решение может быть представлено либо в функциях А.Н. Крылова:

$$\psi_1^n(z) = G_n^n [A_1^n K_1(\psi_n z) + A_2^n K_2(\psi_n z) + A_3^n K_3(\psi_n z) + A_4^n K_4(\psi_n z)],$$

$$\dots \dots \dots (6)$$

$$\psi_2^n(z_2) = G_n^n [4A_1^n K_4(\psi_n z_2) + A_2^n K_1(\psi_n z_2) - A_3^n K_2(\psi_n z_2) - (2 - A_4^n) K_3(\psi_n z_2)],$$

(если оба участка короткие ( $\psi_n z_1 < 4$ ;  $\psi_n z_2 < 4$ ), либо в гиперболических и тригонометрических функциях:

$$\psi_1^n(z) = \frac{G_n^n}{4} \{ e^{-\psi_n z_1} (\cos \psi_n z_1 + \sin \psi_n z_1) + e^{-\psi_n (2z_1 - z)} [(2 + \cos 2\psi_n z_1 - \sin 2\psi_n z_1) \cos \psi_n z_1 + (\cos \psi_n z_1 + \sin \psi_n z_1) \sin \psi_n z_1] \}$$

$$\dots \dots \dots (7)$$

$$\psi_2^n(z_1) = G_n^n e^{-\psi_n z_1} (\sin \psi_n z_1 - \cos \psi_n z_1), \quad \psi_2^n(z_2) = 0,$$

если второй участок - длинный. Коэффициенты  $G_n^n$  зависят от вида нагрузки и от номера члена ряда; постоянные интегрирования  $A_j^n$  определяются по граничным условиям и условиям сопряжения участков,

Полученное решение можно использовать и в тех случаях, когда гильза закрепляется в нескольких сечениях. На рис. 1, в изображен корпус прецизионного электрошпинделя I, закрепленный для наружного шлифования цилиндрических и торцовых поверхностей на оправке 2 с помощью упоров 3, расположенных в двух сечениях по три упора в каждом сечении. Погрешность формы цилиндрических и торцовых поверхностей определялась методом наложения двух решений. В каждом решении было удержано по девяти членов ряда. На рис. 1, а приведены графики составляющих функций  $w_1^n(z)$ ;  $w_2^n(z)$ ;  $w_3^n(z)$ ;  $\sum_{j=1}^9 w_j^n(z)$ , и их суммы (образующая  $\varphi=0$ ). Ряд для перемещения  $w$  сходится быстро и форма образующей достаточно точно описывается первыми тремя членами разложения. На том же рисунке показана форма образующей при  $\varphi=\pi/3$ .

На рис. 1, б показан профиль трех деформированных окружностей торцовой поверхности, построенный с учетом угловых перемещений  $\psi$ : линии А, Б и В соответствуют окружности, описанной внешним внутренним и средним радиусами торцовой поверхности. Неплоскостность торцовой поверхности соизмерима с допуском на торцовое биение, поэтому ее необходимо учитывать при проектировании технологического процесса. Переход на осесимметричное закрепление (рис. 1, г) уменьшит нецилиндричность приблизительно на порядок (линия  $w_1^{(a)}$  на рис. 1, а). С увеличением расстояния от торцов до места закрепления неплоскостность этих торцов уменьшается. Для детали, изображенной на рис. 1, в, г при  $\ell_1 \approx 45$  мм неплоскостность торцовых поверхностей получается пренебрежимо малой.

В качестве второго примера применения решений (6) и (7)

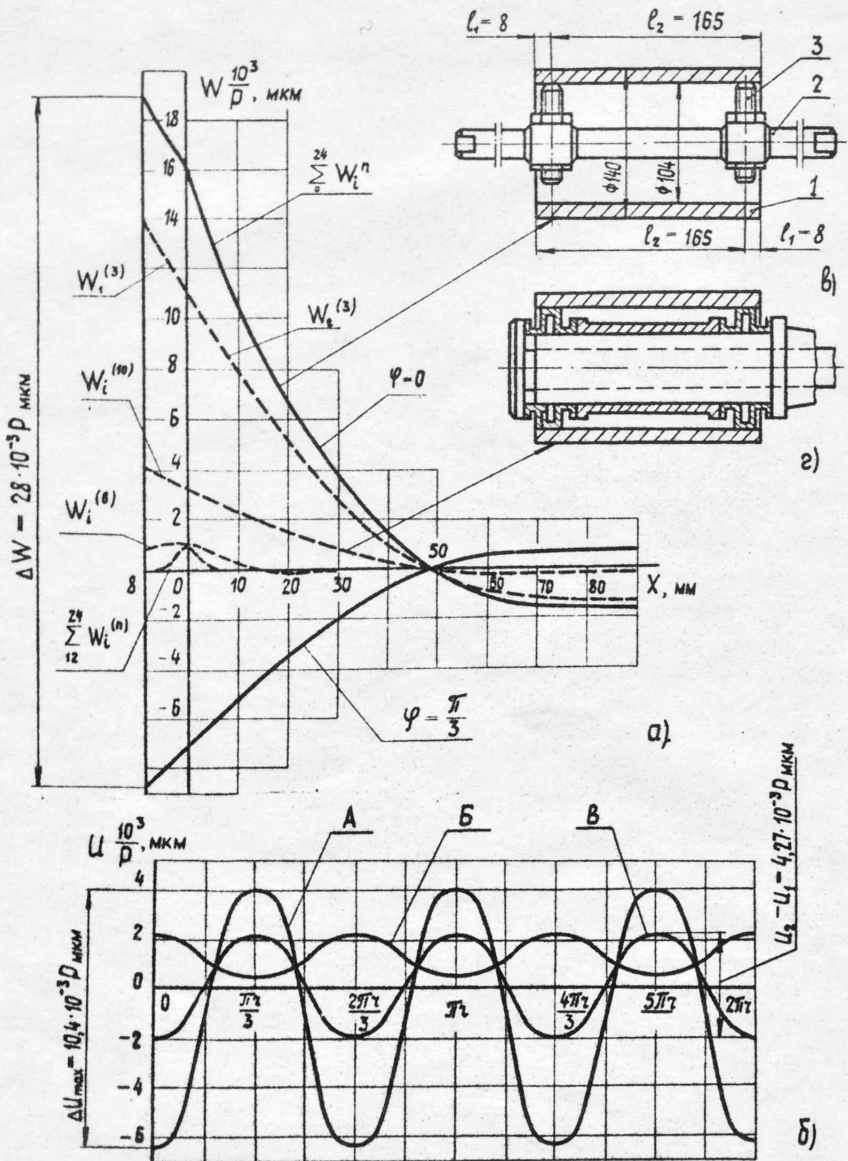


Рис. 1

по полубезмоментной теории приведено исследование деформации цилиндрических втулок при их закреплении в призмах с помощью плоского прижима. Действие призм на втулку сводится к радиальным силам нормального давления и к окружающим силам трения. Направление сил трения определялось в зависимости от направления взаимного смещения трущихся поверхностей в месте контакта. Исследования показали, что силы трения не оказывают существенного влияния на деформацию заготовки. Даже в месте контакта втулки с призмой учет сил трения приводит к занижению величины некруглости примерно на 8%. Для осевых перемещений точек торцевой поверхности получена простая

формула:

$$U = (0,326 \cos \varphi + 1,088 \cos 2\varphi + 0,077 \cos 3\varphi) \cdot 10^{-5} P_{\text{нн}}.$$

Для уменьшения некруглости гильзы и неплоскостности торцов следует делать прижим не плоским, а призматическим. Длина прижима должна быть такой, чтобы силы, действующие на заготовку со стороны опорных призм и прижима, были расположены в одной плоскости. Как показали расчеты, сила закрепления практически не влияет на деформацию торца, если расстояние  $\ell_1$  от торца до места закрепления удовлетворяет следующим условиям:

- а) при осесимметричном закреплении  $\ell_1 \gg (2,3 + 3,0) \sqrt{r h}$ ;  
б) при закреплении в кулачковых, цанговых, мембранных патронах  $\ell_1 \gg C \sqrt{\frac{r}{h}}$ . Коэффициент  $C$  зависит от числа зажимных элементов:

| К | 2       | 3         | 4        | 6         |
|---|---------|-----------|----------|-----------|
| C | 2,3+3,0 | 0,93+1,25 | 0,5+0,65 | 0,21+0,29 |

Если длина  $\ell$  заготовки велика, т.е.  $\sqrt{\frac{\ell}{r}} > 5$ , а  $\ell_1 \leq \ell/2$ , то неплоскостность торцевой поверхности можно оценивать по формуле

$$\Delta U = \frac{2 P_k k r \sqrt{3}}{\pi E h^2 (k^2 - 1)} e^{-\sqrt{k^2 - 1} \xi_1} (\sin \sqrt{k^2 - 1} \xi_1 - \cos \sqrt{k^2 - 1} \xi_1).$$

В той же главе изложена методика определения погрешностей формы гильз, закрепляемых осевыми силами, распределенными по торцам по произвольному закону. Применение этой методики иллюстрируется на примере гильзы, закрепленной на центральной оправке с помощью быстросъемной шайбы с вырезом. Такая шайба контактирует с гильзой по незамкнутому кольцевому пояску торцевой поверхности, поэтому силы взаимодействия распределены по опорному торцу неравномерно. Закон распределения этих сил был исследован экспериментально на специальном стенде и может быть представлен следующей зависимостью:

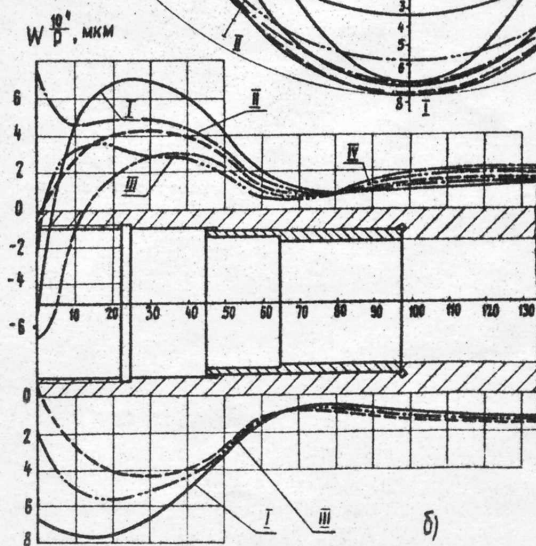
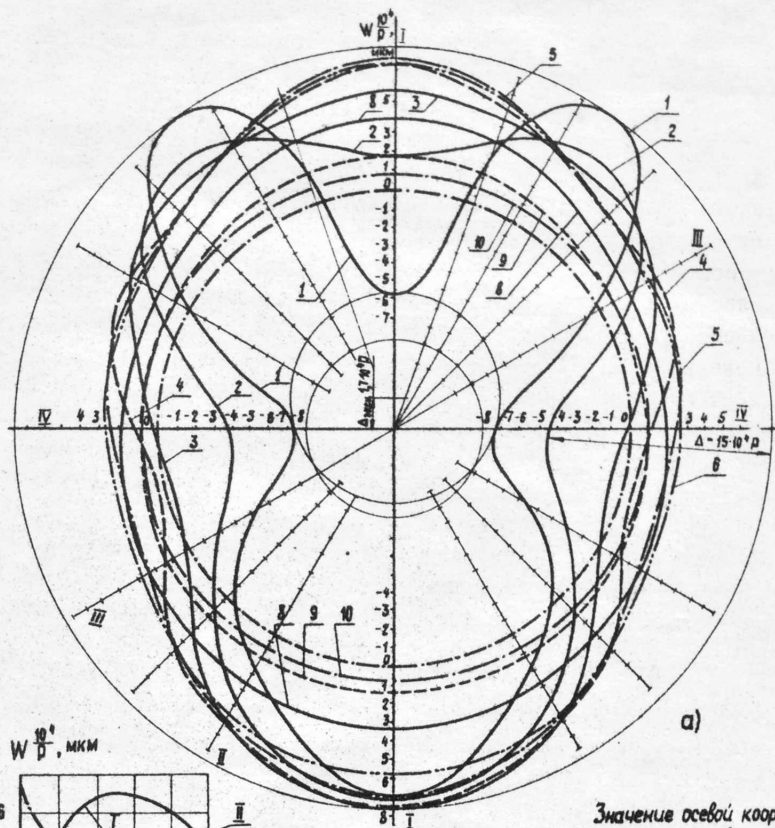
$$N_x^* = \frac{P}{\pi r} [-0,5 - 0,061 \cos 2\varphi + 0,094 \cos 3\varphi + 0,151 \cos 4\varphi + 0,152 \cos 5\varphi + 0,106 \cos 6\varphi + 0,138 \cos 7\varphi + \dots] \frac{r}{\ell} \quad (8)$$

где  $P$  - осевая сила;  $r^*$  - средний радиус контактной поверхности.

Базовый торец контактирует с оправкой по всей кольцевой опорной поверхности, поэтому для гильзы большой длины принят осесимметричный закон распределения нагрузки по этому торцу.

Первый член разложения (8) соответствует осесимметричному сжатию гильзы. Радиальные перемещения  $w_r^{(0)}$  от этой составляющей вычислялись для двух значений коэффициента трения: для  $f=0$  и для  $f=0,15$ . Расчеты показали, что трение уменьшает нецилиндричность примерно на 8%. Ввиду слабого влияния трения в дальнейшем принято, что  $f=0$ . На рис. 2,а показан профиль ряда поперечных сечений, а на рис. 2,б - профиль нескольких продольных сечений гильзы. Вследствие неосесимметричной деформации гильзы, вызванной вырезом в шайбе, оси цилиндров, вписанного в реальную поверхность и описанного вокруг реальной поверхности, смещаются друг относительно друга. Закрепление гильзы с помощью шайбы без выреза приводит только к осесимметричному искривлению образующих (штриховая линия на рис. 2,б). Вырез на шайбе увеличивает нецилиндричность гильзы примерно в 3 раза. Несовпадение равнодействующей сил закрепления с центром шайбы увеличивает нецилиндричность гильзы, а несовпадение с осью гильзы - приводит к дополнительному изгибу этой оси.

Один из разделов главы посвящен исследованию погрешностей формы, возникающих в сопрягаемых деталях в процессе сборки узлов. Весьма точным узлом современных прецизионных станков является шпиндельный узел, собранный в гильзе. Расчеты показали, что геометрически правильная цилиндрическая поверхность гильзы после сборки превращается в сложную поверхность с раструбом у торца. Погрешности формы наружной поверхности ликвидируют окончательным шлифованием гильзы в собранном виде на базе шпинделя. Погрешности же формы, возникшие на внутренних поверхностях собранного узла нельзя компенсировать даже частично. Отклонение от правильных геометрических форм приводит к изменению зазоров в подшипниковых узлах, к возникновению нежелательных кромоочных контактов тел качения и дорожек качения подшипниковых колец. Это приводит к повышенному износу поверхностей сопряжения и снижению долговечности станков. При проектировании шпиндельных узлов, собранных в гильзах, необходимо предварительно оценивать величины радиальных и угловых перемещений по разработанной методике. Это позволяет определять геометрические размеры гильзы исходя из требуемой жесткости. Необходимо также регламентировать величины сборочных усилий.



Значение осевой координаты  $X$ , отсчитываемой от торца: 1-0; 2-6 мм; 3-12 мм; 4-18 мм; 5-26 мм; 6-32 мм; 8-50 мм; 9-60 мм; 10-80 мм.

Рис. 2.

Экспериментальная проверка величин радиальных перемещений производилась на специальной установке и для гильзы станка мод. 2А450 показала хорошую сходимость с расчетными данными.

Предлагаемая методика позволяет рассчитать сборочные погрешности стаканов при установке в них подшипников качения, а также погрешности крышек для крепления последних. Эти погрешности определяют характер контактов устанавливаемых деталей. Влияние их на надежность работы узлов ощутимо.

Долговечность прецизионных узлов на подшипниках скольжения определяется величинами зазоров, равномерностью прилегания трущихся поверхностей, удельными нагрузками на трущиеся поверхности и др. Жесткие допуски на эти параметры выдерживают в процессе механической обработки, однако сборочные усилия вызывают погрешности формы, значительно превосходящие величины зазоров в подшипниках. Надежность работы таких узлов оказывается недостаточной.

В процессе сборки или при закреплении для доводочной операции биметаллические подшипники с осевым регулированием зазоров нагружаются так, что во вкладыше возникает плоское деформированное состояние. Это обстоятельство позволило свести расчет оболочки к расчету статически неопределимого кругового кольца с переменной жесткостью на изгиб в окружном направлении.

Деформация подшипников скольжения при их установке в корпусе должна приводить к образованию между рабочей поверхностью подшипника и валом гидродинамического клина с отношением входной и выходной толщин, равным 2,2. Для этого рабочую поверхность подшипников необходимо обрабатывать до диаметра, превышающего на 0,015-0,020 мм диаметр шпинделя. При создании оптимальных конструкций подшипников необходимо увеличить разницу в жесткостях рабочих и компенсационных участков. Это приведет к более плавной их регулировке и позволит ослабить допуск на размеры сопрягаемых деталей. Затягивание гаек при осевом регулировании зазоров приводит к искривлению образующих. Такие подшипники следует изготавливать с укороченным на 20-25 мм бронзовым слоем со стороны резьбовой части. Предложенные в настоящей работе рекомендации могут быть распространены на другие конструктивные разновидности подшипников.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию деформации заготовок, закрепляемых для механической обработки. Необходимость в таком исследовании возникла потому, что решение задачи о деформировании гильз было получено на основании теории тонких оболочек и затем распространено на гильзы средней толщины.

В первой серии опытов образцы с относительной толщиной  $\delta = 0,21$  закреплялись в трехкулачковом патроне. Исходные погрешности формы и погрешности формы образцов, закрепленных в приспособлении, записывались на приборе Talyzond -2. Сравнение найденных  $\Delta_f^2$  и вычисленных  $\Delta_f^T$  значений погрешностей формы показало их удовлетворительную сходимость. Так для трех сечений первого образца эти погрешности соответственно равны:  $\Delta_{\phi_1}^2 = \Delta_{\phi_2}^2 = 6,5$  мкм;  $\Delta_{\phi_3}^2 = 5$  мкм;  $\Delta_{\phi_1}^T = 6,25$  мкм;  $\Delta_{\phi_2}^T = 6,4$  мкм;  $\Delta_{\phi_3}^T = 4,2$  мкм.

Во второй серии опытов образцы закреплялись в призмах. После операции шлифования торцов приспособление, вместе с закрепленными в нем образцами, установили на стол прибора Talyzond -2, а затем с одной установки записали круглограммы обработанных торцовых поверхностей и цилиндрических поверхностей, а также профиль нескольких образующих. Аналогичные замеры были произведены на разгруженных образцах. Теоретические и экспериментальные значения неплоскостности торцов для двух образцов оказались равными:  $\Delta U_1^T = 3,8$  мкм;  $\Delta U_1^2 = 3,7$  мкм;  $\Delta U_2^T = 1,2$  мкм;  $\Delta U_2^2 = 1,7$  мкм.

В третьей главе приводятся исследования закона распределения контактной нагрузки, возникающий между гильзой и приспособлением при закреплении по торцам. Для этой цели был изготовлен специальный стенд, позволяющий методом тензометрирования измерять величину контактной нагрузки в 24 точках торцовой поверхности. В качестве объекта исследования была взята быстротъемная шайба с вырезом, широко применяемая в производстве для ускорения процесса сборки и разборки станочных приспособлений. В результате проведенного исследования было установлено, что вырез в шайбе приводит к неравномерному распределению усилия по опорному торцу. На части поверхности, расположенной против выреза, контактное давление отсутствует. Вблизи выреза оно возрастает и в 2-3 раза превышает среднее значение. По мере удаления от выреза наблюдается сначала падение, а затем снова увеличение усилия. На закон распределения нагрузки на гильзу существенное влияние оказывает толщина шайбы и точность центрирования шайбы относительно оси закрепляемой детали.

В четвертой главе даются руководящие материалы по выбору и номографическому расчету зажимных устройств для механической обработки деталей типа гильз и колец. С целью упрощения практического использования результатов теоретического решения, полученного во второй главе, по результатам машинного счета были составлены таблицы, в которых приведены величины перемещений в месте приложения сил закрепления ( $W_1$ ) и между силами ( $W_2$ ), а также наи-

большей некруглости и нецилиндричности гильзы. Там же приведены графики нецилиндричности, возникающей при закреплении гильз в патронах с числом зажимных элементов от  $K=2$  до  $K=12$ , а также в приспособлениях, обеспечивающих осесимметричное закрепление. Таблицы и графики составлены для гильз, относительная длина и толщина которых находится в пределах  $\lambda = \ell/\tau = 2+10$ ;  $\delta = h/\tau = 0,005+0,5$ , для трех вариантов закрепления: по краю гильзы ( $\ell_1=0$ ), на расстоянии  $\ell_1 = \ell/4$  от края и в среднем сечении ( $\ell_1 = \ell/2$ ).

При осесимметричном закреплении гильз любой длины и толщины осевыми силами нецилиндричность определяется по графику, построенному в зависимости от безразмерного параметра ее длины  $\delta_0 = \beta_0^2$ . Методика использования таблиц и графиков в технологических расчетах показана на примерах.

В последнем разделе главы дается методика определения погрешностей формы колец, закрепляемых для обработки в кулачковых и других патронах. Рассматривается общий случай закрепления, когда плоскость действия сил не совпадает со средней плоскостью кольца. Приводятся формулы для вычисления радиальных, осевых и угловых перемещений в двух продольных сечениях, проходящих через точки приложения сил и между силами. Приводится также методика учета угловых перемещений при определении наибольшей некруглости и неплоскостности кольца.

### Основные выводы

На основании проведенного исследования деформации деталей типа гильз и колец силами закрепления можно сделать следующие выводы:

1. Зажимные элементы приспособлений вызывают упругие деформации прецизионных деталей вполне соизмеримые, а в отдельных случаях превосходящие допустимые отклонения формы. Поэтому необходимо регламентировать силы закрепления, которые действуют на заготовку при механической обработке и сборке.

2. Закрепление цилиндрических деталей для механической обработки и сборки в кулачковых, цанговых, мембранных и других патронах, имеющих "К" зажимных элементов, а также закрепление в призмах, приводит к возникновению погрешностей круговой формы поперечных сечений и искривлению образующих закрепляемых деталей. Закрепление тех же деталей в приспособлениях с гофрированными втулками, пластинчатыми пружинами и других приспособлениях, в которых реализуется осесимметричное закрепление, приводит только к

возникновению осесимметричного искривления образующих. Пространственные погрешности формы, вызванные радиальными и касательными силами, приложенными к боковой поверхности детали, следует определять по предлагаемой методике.

3. При постоянном моменте трения, передаваемом приспособлением, увеличение числа зажимных элементов уменьшает погрешности формы закрепляемых деталей и в случае закрепления осесимметричными нагрузками эти погрешности будут минимальными.

4. Наименьшие погрешности формы вызывает закрепление гильз осесимметричными осевыми силами, если эти силы приложены к срединной поверхности гильзы. Погрешности формы, вызванные таким закреплением гильз, должны оцениваться по предлагаемой методике.

5. Закрепление цилиндрических деталей осевыми силами, распределенными по опорной поверхности по произвольному закону, вызывает искажение круговой формы поперечных сечений и искривление образующих, а также смещение оси цилиндра, вписанного и реальную поверхность, по отношению к оси цилиндра, описанного вокруг этой поверхности. Погрешности формы при таком закреплении будут в несколько раз больше, чем при осесимметричном закреплении и могут быть вычислены по предлагаемой методике.

6. На закон распределения контактного давления, возникающего между гильзой и приспособлением при закреплении по торцам, существенное влияние оказывает точность формы и взаимного расположения контактируемых поверхностей. Для выявления этого закона целесообразно использовать экспериментальный метод, разработанный в настоящем исследовании.

7. Под действием произвольной внешней нагрузки короткие цилиндрические детали с безразмерным параметром длины  $\gamma_n = \beta_n l \leq 0,2 + 0,4$  деформируются практически без искажения формы их продольного (проходящего через ось) сечения. При этом образующие, оставаясь прямыми, лишь поворачиваются на некоторый угол, переменный в окружном направлении, а торцовые поверхности деформируются. Радиальные, осевые и угловые перемещения таких деталей предлагается рассчитывать как кольца по методике, разработанной в настоящем исследовании.

8. Под действием усилий, возникающих на сборке, детали типа гильз и колец получают погрешности, соизмеримые с допуском на их изготовление. Предлагаемая методика расчета сборочных погрешностей позволяет также критически оценить конструкцию собираемых деталей.

9. В подшипниках скольжения с осевым регулированием зазоров

затягивание гаек при сборке, кроме формирования несущего гидродинамического клина, приводит к нежелательному искривлению обрабатываемой со стороны резьбового конца подшипника. Надежность работы таких подшипников можно повысить за счет увеличения жесткости рабочих участков; финишной обработки этих участков в сборе с корпусом до диаметра, превышающего на 0,015-0,020 мм диаметр шпинделя; укорочения бронзового слоя со стороны резьбовой части на 20-25мм.

Основное содержание диссертации изложено в статьях:

1. Кулешова З.Г., Дальский А.М., Определение погрешностей формы деталей шпиндельных узлов прецизионных станков, возникающих при сборке, "Расчеты на прочность", вып. 13, изд-во "Машиностроение", 1968.
2. Кулешова З.Г., Исследование погрешностей формы гильз прецизионных станков, возникающих вследствие деформаций, вызванных силами закрепления при механической обработке, "Известия вузов", Машиностроение, 1969, № II.
3. Кулешова З.Г., Котова Г.А., Расчет деформаций подшипников скольжения прецизионных шпиндельных узлов в процессе сборки, "Известия вузов", Машиностроение, 1972, № 3.
4. Кулешова З.Г., Котова Г.А., Экспериментальное определение деформаций подшипника, возникающих при регулировании зазоров в процессе сборки, "Известия вузов", Машиностроение, 1972, № 4.