



СОЮЗ СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

(19) SU (11) 1414581 A1

(5D) 4 В 24 В 13/02

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

- (21) 4111718/31-08
(22) 23.06.86
(46) 07.08.88. Бюл. № 29
(71) Белорусский политехнический институт
(72) И.П. Филонов, П.П. Анципович,
и А.П. Якимахо
(53) 621.923.5 (088.8)
(56) Авторское свидетельство СССР
№ 1113237, кл. В 24 В 13/02, 1982.
(54) СПОСОБ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
(57) Изобретение относится к технологии оптического приборостроения и может быть использовано при обработке линз, а также сферических поверхнос-

тей, связанных со стержнем. Цель изобретения состоит в повышении производительности и качества обработки, а также в более рациональном использовании алмазного инструмента и повышении его размерной стойкости. Обработку сферических поверхностей ведут по меньшей мере двумя концентричными рабочими элементами в виде труб с торцовыми рабочими поверхностями с поэтапным ступенчатым изменением скоростей их вращения и давления и бесступенчатым изменением режимов между этапами в соответствии с износом сопряженных поверхностей инструмента и детали. 11 ил.

(19) SU (11) 1414581 A1

Изобретение относится к машиностроению и может найти применение в оптической промышленности для обработки линз, а также для обработки сферических поверхностей, связанных со стержнем, в частности сферических кинематических пар манипуляторов, а также шаров большого диаметра.

Цель изобретения - повышение производительности и качества обработки за счет рационального использования алмазного инструмента и повышения его размерной стойкости.

На фиг. 1 изображены обрабатываемая деталь и инструмент, разрез плоскостью, совпадающей с их осями вращения; на фиг. 2 - то же, вид сверху со снятым инструментом; на фиг. 3 - вид А на фиг. 1; на фиг. 4 - эпюры износа сопряженных поверхностей; на фиг. 5 - схема, поясняющая оценку закона распределения давления по обрабатываемой поверхности; на фиг. 6 - элементарный участок поверхности; на фиг. 7 - график изменения давления за цикл обработки; на фиг. 8 - график изменения угловой скорости инструмента; на фиг. 9 - схема станка для обработки сферических поверхностей; на фиг. 10 - разрез Б-Б на фиг. 9; на фиг. 11 - разрез В-В на фиг. 9.

Обрабатываемую поверхность детали 1 и рабочую поверхность инструмента 2 разбивают на соответствующие окружности с центрами, совпадающими с их осями вращения, и радиусами, зависящими от количества выбранных окружностей на поверхности инструмента.

Если считать, что поверхность инструмента имеет идеальную форму, то всякое отклонение формы притираемой к ней поверхности вызовет сигнал несогласования, выражающиеся в изменении удельной мощности в зоне отклонения, что приведет к местному изменению интенсивности износа, направленному на постепенную ликвидацию этого несогласования.

Существует функциональная взаимосвязь между изменением скорости скольжения в некоторых точках зоны контакта и законом распределения давления в них, эта связь устанавливается на основании рассмотрения условия касания тел, когда при любой форме изношенных поверхностей деталей наблюдается полный контакт сопряженных поверхностей.

Таким образом управление процессом требует оценки износа в некоторых сопряженных точках обрабатываемой поверхности и рабочей поверхности инструмента. Причем эти точки должны располагаться на концентрических окружностях инструмента и детали. После выбора таких точек определяют скорости скольжения (изнашивания) $V_{ск}^{ij}$ в них по каждой концентрической окружности инструмента. Разбивку сопряженных поверхностей инструмента и обрабатываемой поверхности на окружности инструмента радиуса r_i и детали радиуса R_j производят по формуле

$$r_i = r_n^{\max} - (i-1) \frac{r_n^{\max}}{n}, \quad (1)$$

где n - количество окружностей радиуса r_i , выделяемых на рабочей поверхности инструмента; i - порядковый номер окружности (фиг. 1 и 2).

Радиус концентрических окружностей на обрабатываемой поверхности определяют по формуле

$$R_j = R_c \sin\left(\frac{\Delta}{2} - \delta_j\right), \quad (2)$$

где $\frac{\Delta}{2}$ - половина центрального угла обрабатываемой детали, измеряемого дугой окружности, расположенной в диаметральной плоскости рабочей поверхности инструмента (фиг. 1);

R_c - радиус обрабатываемой сферической поверхности;

δ_j - половина центрального угла инструмента, соответствующего окружности r_i .

Как видно из фиг. 1 текущее значение центрального угла Δ_j , соответствующего радиусу R_j , определяется соотношением $\Delta_j = \frac{\Delta}{2} - \delta_j$. Такое разбиение сопряженных сферических поверхностей позволяет выделить сопряженные точки ij как точки пересечения соответствующих окружностей (фиг. 2, 3, 6).

Конечным результатом способа является управление величиной сближения сопряженных поверхностей и управление скоростью вращения каждого кольцевого инструмента в соответствии с изменением величины M_j (динамической эпюры давления) из условия сохранения постоянной средней оптимальной мощнос-

ти, затрачиваемой на процесс обработки алмазным инструментом. Оптимальной мощностью резания можно считать мощность, соответствующую $[V_{ск}] = 8 - 25$ м/с и давлению в зоне обработки $[P] = (3-5) \cdot 10^4$ Па. Поэтому минимальной скоростью вращения инструмента следует считать такую, при которой скорость изнашивания (скорость скольжения) в какой-либо сопряженной точке ij на окружности r_i ; была бы не менее $[V_{ск}]$.

Оптимальная средняя мощность резания устанавливается из тех соображений, чтобы при сплошном сферическом трубчатом инструменте соотношение скоростей вращения его ω_u^{cp} и обрабатываемой детали ω_d соответствовало бы скорости скольжения в какой-либо сопряженной точке не менее $[V_{ск}]$. Величина этой усредненной скорости инструмента связана со средними значениями (ω_u^{cp}) скорости вращения отдельных инструментов соотношением

$$\omega_u^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_u^{cp})_i}{\sum_{i=1}^n i},$$

где $\sum_{i=1}^n i$ - сумма окружностей радиуса r_i инструментов (суммарное количество концентрических трубчатых инструментов).

Поддержание скоростей вращения инструментов и давления в таких диапазонах позволит наиболее полно использовать режущие свойства алмазного порошка в алмазном слое, а также связать показатели технологического процесса с геометрическими параметрами сопряженных поверхностей, кинематикой станка и динамикой износа рабочей поверхности инструмента и обрабатываемой поверхности.

Скорость изнашивания поверхностей инструмента и детали в каждой точке ij находится из соотношений

$$\left. \begin{aligned} \delta_u^{ij} &= K_u V_{ск}^{ij} P^{ij} \\ \delta_g^{ij} &= K_g V_{ск}^{ij} P^{ij} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Скорость износа сопряжения в этих же точках определяется по формуле (фиг. 4)

$$\delta_{u.g}^{ij} = \frac{\delta_u^{ij} + \delta_g^{ij}}{\cos \delta_i} = (K_u + K_g) \frac{V_{ск}^{ij}}{\cos \delta_i} P^{ij}, \quad (4)$$

где K_u и K_g - коэффициенты, характеризующие износостой-

кость инструмента и детали соответственно.

Как видно из фиг. 1-3, скорость скольжения в сопряженных точках определяется из уравнения

$$V_{ск}^{ij} = \sqrt{(V_{ij}^u)^2 + (V_{ij}^d)^2 - 2V_{ij}^u V_{ij}^d \cos \alpha_v}.$$

С учетом того, что $V_{ij}^u = \omega_u r_i$; $V_{ij}^d = \omega_d R_j$, а также с учетом зависимостей (1), (2) после некоторых преобразований получаем

$$V_{ск}^{ij} = R_c \sqrt{\omega_u^2 \sin^2 \delta_i + \omega_d^2 \sin^2 \delta_j - 2\omega_u \omega_d \sin \delta_i \sin \delta_j \cos \alpha_v}. \quad (5)$$

Из фиг. 2 и 3 видна следующая связь угла α_v между линейными скоростями точек ij , принадлежащих инструменту и детали с углом α_{rR} между радиусами r_i и R_j .

$$\alpha_v = 180 - \alpha_{rR}. \quad (6)$$

Угол α_{rR} найдется из треугольника, образованного сторонами $O_1C = r_{макс} - h_{ij} \sin \frac{\Delta}{2}$; r_i ; $R_j \cos \frac{\Delta}{2}$. На фиг. 3

показан треугольник, образованный сторонами, расположенными между центром окружности R_u , точкой пересечения этой окружности с первой окружностью инструмента r_i (точка 14) и центром окружностей инструмента C

$$\cos \alpha_{rR} = \frac{(R_j \cos \frac{\Delta}{2})^2 + r_i^2 - (r_{макс} - h_{ij} \sin \frac{\Delta}{2})^2}{2R_j r_i \cos \frac{\Delta}{2}}, \quad (7)$$

где $h_i = R_c(1 - \cos \Delta_j)$. (8)

Приведенные зависимости позволяют определить взаимосвязь износа сопряженных поверхностей и перераспределение в результате этого давления в зоне контакта. Эта взаимосвязь и положена в основу предлагаемого способа управления процессом обработки. Управление может быть реализовано по жесткой программе. Для этого необходимо расчетным путем определить время износа (изменение давления) и выровнять его, изменив точку приложения силы P_0 (фиг. 5), т.е. сместить ее относительно центральной оси инструмента на величину l , определяемую расчетным путем. Этим самым достигается более равномерный износ обрабатываемой поверхности. Равномерность же износа

рабочих поверхностей инструмента достигается изменением (увеличением) скорости вращения центральных инструментов по отношению к периферийным. Время (начало изменения скоростей) определяется при жестком программировании (управлении) также расчетным путем. При этом последовательность расчетов состоит в следующем.

Определяют давление в зоне контакта из условия полного прилегания контактирующих поверхностей. Это соответствует некоторому времени их работы на этом этапе (фиг. 7 и 8), характеризующимся временем t^p и t^{ω} обработки при минимальном давлении и одинаковой скорости всех инструментов. Давление от силы P определяется следующей зависимостью

$$P_{ij} = \frac{P}{2\pi R_c (h_{\max}^u - h_{\min}^u)} = \frac{P}{2\pi R_c^2 (\cos \delta_{\min}^i - \cos \delta_{\max}^i)} \quad (9)$$

В знаменателе формулы (9) — поверхность шарового сегмента (обрабатываемой детали), которая равна сумме криволинейных прямоугольников (фиг. 6) в результате разбиения сопряженных поверхностей окружностями радиуса r_i и R_j . В уравнении (9) δ_{\min}^i — угол, соответствующий минимальному радиусу инструмента (центральному отверстию) $\delta_{\max}^i = \frac{\Delta}{2}$.

Определяют скорость изнашивания инструмента и детали в точках а и е (фиг. 1 и 4), т.е. в точках касания первой окружности инструмента с последней m -й окружностью детали и в центре обрабатываемой детали по формулам

$$\left. \begin{aligned} \delta_u^u &= K_u P^u \omega_u r_i \\ \delta_g^u &= K_g P^u \omega_u r_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_u^{im} &= K_u P^{im} R_c (\omega_u \sin \frac{\Delta}{2} + \omega_g \sin \Delta) \\ \delta_g^{im} &= K_g P^{im} R_c (\omega_u \sin \frac{\Delta}{2} + \omega_g \sin \Delta) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Скорости изнашивания сопряжения в этих же точках определяется с учетом соотношений (4)

$$\delta_{u-g}^u = (K_u + K_g) P^u \omega_u R_c \sin \frac{\Delta}{2}; \quad (12)$$

$$\delta_{u-g}^{im} = (K_u + K_g) P^{im} R_c (\omega_u \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2} + \omega_g \frac{\sin \Delta}{\cos \frac{\Delta}{2}}) \quad (13)$$

Уравнения (12), (13) решаем из условия того, что давление в каждой точке ij , определяемое уравнением (9), постоянное, т.е. $P^u = P^{im} = P_{ij} = \text{const}$. Определив таким образом скорости изнашивания в точках 11 и 1m определяют в них давления из уравнений

$$\left. \begin{aligned} P^u &= \frac{\delta_{u-g}^u}{(K_u - K_g) \omega_u R_c \sin \frac{\Delta}{2}}; \\ P^{im} &= \frac{\delta_{u-g}^{im}}{(K_u + K_g) R_c (\omega_u \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2} + \omega_g \frac{\sin \Delta}{\cos \frac{\Delta}{2}})} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Из суммы моментов сил, действующих в плоскости оас (фиг. 4) относительно точки с, находим положение силы P_e , обеспечивающее выравнивание давления, которое перераспределилось в результате неравномерного износа

$$1 = \frac{(P^u - P^{im}) r_i}{P_e} \quad (15)$$

Совместное решение уравнений (14), (15) дает следующее соотношение

$$1 = \frac{1}{P_e \omega_u (K_u + K_g)} \left(\delta_{u-g}^u - \frac{\delta_{u-g}^{im} \sin \frac{\Delta}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\Delta}{2} + \frac{\omega_g}{\omega_u} \frac{\sin \Delta}{\cos \frac{\Delta}{2}}} \right) \quad (16)$$

Уравнение (16) позволяет изменять точку приложения силы в зависимости от кинематики, геометрии и износостойкости сопряженных поверхностей и тем самым выравнивать износ обрабатываемой поверхности. Начало изменения точки приложения силы P_e по закону, определяемому уравнением (16), определяется временем перераспределения давления в точках 11 и 1m, в результате которого значения P^u и P^{im} выходят за выбранные оптимальные значения.

Определяют среднюю скорость изнашивания по i -й и j -й окружностям по формулам

$$\delta_i = \frac{\sum_{ij} \delta_{ij}^u}{2\pi r_i} = K_u P_{ij} \frac{\sum_{ij} V_{ск}^{ij}}{2\pi r_i}; \quad (17)$$

$$\delta_j = \frac{\sum_{ij} \delta_{ij}^g}{2\pi R_j} = K_g P_{ij} \frac{\sum_{ij} V_{ск}^{ij}}{2\pi R_j} \quad (18)$$

Определяют среднюю скорость изнашивания по рабочей поверхности i -го инструмента (по фиг. 1, 2, 6)

как частное от деления суммы средних скоростей изнашивания по i -м окружностям каждого инструмента в пределах его минимального радиуса $r_{\text{мин}}$ и максимального $r_{\text{макс}}$ на выбранное количество этих окружностей в тех же пределах

$$(\gamma_{\text{ср}}^i)^u = \frac{\sum_i \gamma_i}{\sum_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} r_i} = \frac{K_u P_{ij}}{2\pi \sum_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} r_i} \sum_i \frac{\sum V_{\text{ск}}^{ij}}{r_i} \quad (19)$$

Определяют среднюю скорость изнашивания по участкам обрабатываемой поверхности, сопряженным с поверхностями i -го инструмента. Такими участками являются участки обрабатываемой поверхности, расположенные между окружностями радиуса $R_j^{\text{мин}}$ и $R_j^{\text{макс}}$, которые касаются соответствующих окружностей минимальных и максимальных радиусов $r_{\text{мин}}$ и $r_{\text{макс}}$ каждого инструмента

$$(\gamma_{\text{ср}}^j)^u = \frac{\sum_j \gamma_j}{\sum_{R_j^{\text{мин}}}^{R_j^{\text{макс}}} j} = \frac{K_u P_{ij}}{2\pi \sum_{R_j^{\text{мин}}}^{R_j^{\text{макс}}} j} \sum_j \frac{\sum V_{\text{ск}}^{ij}}{R_j} \quad (20)$$

Количество окружностей $\sum_j j$ в зоне обрабатываемой поверхности, расположенной между $R_j^{\text{мин}}$ и $R_j^{\text{макс}}$ выбирается равным количеству окружностей

$$(P_{ij}^u)^u = \frac{2\pi (\gamma_{\text{ср}}^j)^u}{\frac{K_u}{\sum_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} i} \sum_i \frac{\sum V_{\text{ск}}^{ij}}{r_i \cos \delta_i} + \frac{K_u}{\sum_{R_j^{\text{мин}}}^{R_j^{\text{макс}}} j} \sum_j \frac{\sum V_{\text{ск}}^{ij}}{R_j \cos \delta_{ij}}} \quad (22)$$

Из фиг. 5 видно, что

$$P = \int P \cos \delta_i ds = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (23)$$

т.е. при равномерном распределении силы P по всем i -м окружностям инструмента и всем инструментам на каждую из них (на каждый инструмент) приходится сила

$$Q_i = \frac{P}{n} = (N_{\text{сум}}^i)^u = \sum_j (P_{ij}^u)^u, \quad (24)$$

тогда суммарная нормальная сила, действующая на рабочую поверхность i -го инструмента определяется из уравнения

$$(N_{\text{сум}}^i)^u = Q_i = \int P_{ij} \cos \delta_i dci = \\ = R_c^2 \int_0^{2\pi} d\alpha \int_{\delta_i^{\text{мин}}}^{\delta_i^{\text{макс}}} (P_{ij}^u)^u \sin \delta_i \cos \delta_i \alpha d\delta_i =$$

той в сопряженной зоне инструментов $r_{\text{макс}}$ $\sum_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} i$, при этом каждые окружности i и j касаются в плоскости, совпадающей с осями вращения детали и инструмента.

Определяют средний износ сопряжения в зоне контакта i -го инструмента по формуле (4), которое с учетом уравнений (19), (20) примет вид

$$(\gamma_{\text{ср}}^j)^u = \frac{P_{ij}}{2\pi} \left(\frac{K_u}{\sum_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} i} \sum_i \frac{\sum V_{\text{ск}}^{ij}}{r_i \cos \delta_i} + \frac{K_u}{\sum_{R_j^{\text{мин}}}^{R_j^{\text{макс}}} j} \sum_j \frac{\sum V_{\text{ск}}^{ij}}{R_j \cos \delta_{ij}} \right) \quad (21)$$

При определении износа сопряженных зон детали в направлении действия силы P следует иметь в виду, что каждая j -я окружность обрабатываемой поверхности пересекает различные i -е окружности инструмента (фиг. 2, 3, 6) так что $\cos \delta_{ij}$ в точках пересечения одной окружности R_j будет различным в отличие от $\cos \delta_i$, характеризующего точки пересечения одной i -й окружности инструмента с различными j -ми окружностями обрабатываемой поверхности.

Из уравнения (21) имеем

$$= \pi 2R_c^2 \int_{\delta_i^{\text{мин}}}^{\delta_i^{\text{макс}}} P_{ij} \sin \delta_i \cos \delta_i d\delta_i \quad (25)$$

При $P_{ij} = \text{const}$ имеем

$$Q_i = \frac{P}{n} = 2P_{ij} \pi R_c^2 \frac{1}{2} (\cos 2\delta_i^{\text{мин}} - \cos 2\delta_i^{\text{макс}}), \quad (26)$$

где $\delta_i^{\text{мин}}$, $\delta_i^{\text{макс}}$ - центральные углы, соответствующие минимальному $r_{\text{мин}}$ и максимальному $r_{\text{макс}}$ радиусам i -го инструмента.

Подставляя уравнение (22) в уравнение (26), находим окончательное среднее значение износа сопряжения i -го инструмента по формуле

$$(\gamma_{u-g}^{cp}) = \frac{P \left(\frac{K_u}{\sum_{i=1}^{n_{\max}} \sum_{j=1}^{n_{\min}} V_{cp}^{ij}} + \frac{K_g}{\sum_{j=1}^{n_{\max}} \sum_{i=1}^{n_{\min}} V_{ck}^{ij}} \right)}{n \cdot \pi \cdot R_c^2 (\cos 2\delta_i^{\min} - \cos 2\delta_i^{\max})} \quad (27)$$

По этой формуле можно подсчитать скорость изнашивания сопряжения (или величину износа сопряжения $U_{u-g} = \gamma_{u-g} \cdot t$) в каждой средней зоне i -го инструмента в зависимости от режимов обработки (силовых P и скоростных ω_n, ω_g) (5), размеров инструмента и детали, а также угла между осями вращения инструмента и детали и различных коэффициентов K_u износостойкости инструментов.

Определяют распределение давления по инструментам с учетом суммарного износа в них контактирующих поверхностей из совместного решения уравнений (22), (27).

$$(P_{ij}^i)^u = \frac{2P}{\pi \cdot \pi \cdot R_c^2 (\cos 2\delta_i^{\min} - \cos 2\delta_i^{\max})} \quad (28)$$

$$U_i^u = (\gamma_{cp}^i) \cdot t^u = \frac{2K_u \cdot P \cdot N_i \cdot \sum_{j=1}^{n_{\max}} \frac{V_{ck}^{ij}}{R_j}}{\omega_u^i \cdot \pi \cdot \pi \cdot R_c^2 (\cos 2\delta_i^{\min} - \cos 2\delta_i^{\max}) \sum_{i=1}^{n_{\max}} i} \quad (29)$$

$$U_j^g = (\gamma_{cp}^j) \cdot t^g = \frac{K_g \cdot P \cdot \alpha \cdot R_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{\max}} \frac{V_{ck}^{ij}}{R_i}}{\omega_g \cdot \pi \cdot \pi \cdot R_c^2 (\cos 2\delta_j^{\min} - \cos 2\delta_j^{\max}) \sum_{j=1}^{n_{\max}} j} \quad (30)$$

В формулах (29), (30) $t_u = \frac{2\pi N_n}{\omega_u}$ — время контакта (износа) сопряженных поверхностей; N_u — количество оборотов i -го инструмента, αR_j — угол, измеряемый дугой окружности радиуса R_j , расположенной в зоне контакта ее с инструментом.

Как видно из фиг. 2, 3 угол αR_j может быть найден из выражения

$$\alpha R_j = 2 \arccos \alpha_{R_j}^{ij} \quad (31)$$

где $\alpha_{R_j}^{ij}$ — угол между радиусами векторами окружностей детали в точках пересечения их с первой окружностью инструмента (на фиг. 2, 3 показан угол $\alpha_{R_j}^{ij}$).

Уравнение (28) позволяет определить значение усредненного давления, (постоянного) действующего на поверхности i -го инструмента, которое обеспечивает его износ одинаковый с реальным давлением (действительным). Такое представление во многом облегчает численное решение задачи, а с учетом того, что в большинстве случаев разность между наибольшим и наименьшим радиусами соосных инструментов находится в пределах 2-10 мм, это допущение не нарушает существенно действительной картины перераспределения в результате износа.

Определяют форму обрабатываемой поверхности и рабочей поверхности каждого инструмента в сопряженных зонах из уравнений (19), (20) с учетом уравнения (28) по формулам

$$\cos \alpha_{R_j}^{ij} = \frac{(R_{ij} \cos \frac{\Delta}{2})^2 + (r_i - h_j \sin \frac{\Delta}{2})^2 - (r_i)^2}{2R_{ij} \cos \frac{\Delta}{2} (r_i - h_j \sin \frac{\Delta}{2})} \quad (32)$$

Таким образом, повышение размерной стойкости инструмента и равномерности износа обрабатываемой поверхности достигается при обеспечении распределения давления между соосными инструментами по закону, устанавливаемому формулой (28). В этом случае все инструменты вращают с одинаковой скоростью в соответствии с предлагаемыми этапами (фиг. 7, 8). Однако такое жесткое программирование не позволяет учесть изменяющиеся условия трения, связанные с режимами обработки, температурными характеристиками и т.п.

Для поддержания условий работы алмазонного слоя в оптимальном диапазоне необходимо сохранять в некотором диапазоне мощность сил резания (трения), а об отклонении их значения от требуемого судить по изменению крутящего момента каждого инструмента в процессе обработки.

Элементарный момент сил трения $dM_{тр}^i$, действующий на рабочей поверх-

ности i -го инструмента с учетом коэффициента трения f запишется как $dM_{тр}^i = Zfr_i dN_i$ (фиг. 5). Учитывая, что $dN_i = (P_{ij})^i dS$; $r_i = R_c \sin \delta_i$; $dS = R_c r_i d\delta_i d\omega r$, получим

$$(dM_{тр}^i)^u = Zf(P_{ij})^u R_c^3 \sin^2 \delta_i d\delta_i d\omega r. \quad (33)$$

С учетом формулы (28) после интегрирования получим

$$(M_{тр}^i)^u = \frac{2fPR_i [Z(\delta_i^{\max} - \delta_i^{\min}) - (\sin 2\delta_i^{\max} - \sin 2\delta_i^{\min})]}{n(\cos 2\delta_i^{\min} - \cos 2\delta_i^{\max})}. \quad (34)$$

Уравнение (34) позволяет определить изменение крутящего момента на инструментах в связи с износом сопряженных зон. Начальное значение суммарного крутящего момента после приработки, когда давление по всей поверхности инструмента постоянное, определится из уравнения (33) после интегрирования в пределах $0 \leq \delta_i \leq \frac{\Delta}{2}$.

В этом случае решение этого уравнения совместно с (9) дает

$$M_{тр}^u = \sum_{i=1}^n M_{тр}^i = \frac{ZfPR_c \left(\frac{\Delta}{2} - \frac{1}{4} \sin \Delta \right)}{1 - \cos \Delta}. \quad (35)$$

Таким образом, автоматическое (адаптивное) управление основано на поддержании постоянного значения мощности сил трения в процессе всего времени использования инструмента с учетом его износа.

Уравнение (35) позволяет определить наибольшую мощность, которая достигается после некоторой приработки на первом этапе обработки (фиг. 7 и 8) при вращении всех инструментов с одинаковой скоростью. В конце первого этапа обработки наступает перераспределение сил трения в зоне контакта каждого из инструментов, обусловленное износом сопряжения. Датчики, установленные на каждом инструменте, фиксируют это значение и при достижении их значений, менее установленного, подается команда на изменение (увеличение) угловой скорости инструментов с целью поддержания мощности сил резания в зоне контакта каждого инструмента постоянной. Величина угловой скорости каждого инструмента определяется из условия рациональных энер-

гозатрат на процесс обработки, определяемый равенством

$$M_{тр}^u \omega_u = \sum_{i=1}^n M_{тр}^i \omega_u^i,$$

откуда

$$\omega_u^i = \omega_u \frac{M_{тр}^u}{\sum_{i=1}^n M_{тр}^i}. \quad (36)$$

Как видно из уравнений (34) и (35) моменты от сил трения на инструментах зависят от их геометрии, количества и величины прижимной силы, так что при поддержании постоянных условий трения (коэффициента f) такое изменение угловой скорости можно запрограммировать во времени, просчитав изменение $(M_{тр}^i)^u$ по формуле (34) и $M_{тр}^u$ по формуле (35).

Проведенные расчеты показывают, что угловые скорости инструментов должны распределяться на втором этапе обработки в соответствии с графиком на фиг. 8. Это обеспечивает равномерный износ инструментов и поддержание его постоянным в процессе обработки ввиду того, что неравномерность износа обусловлена кинематикой (неравномерностью скоростей относительного движения инструмента и детали в сопряженных токах).

Величина силы режима P на первом этапе (на этапе приработки) и в процессе дальнейшей обработки устанавливается для всего инструмента и отдельных инструментов из уравнений (9) и (28) из условий сохранения давления в зоне контакта в пределах допустимых $[P]$ для радиального использования алмаза в алмазном слое. Тогда для случая вращении всего инструмента (на первом этапе) начальное

значение прижимного усилия определяется из выражения

$$P = [P] 2\pi R_c^2 (1 - \cos \frac{\Delta}{2}). \quad (37)$$

В процессе износа суммарная сила прижима должна находиться из условия отсутствия возможности повышения в зоне контакта каждого инструмента допустимого давления т.е.

$$P = \pi R_c^2 \sum_{i=1}^n [P] (\cos 2\delta_{i \max} - \cos 2\delta_{i \max}). \quad (38)$$

Предлагаемый способ автоматического управления силовыми и скоростными характеристиками в процессе обработки сферических поверхностей требует некоторых предварительных расчетов, поэтому он более эффективен при использовании ЭВМ непосредственно в станке. В этом случае нетрудно реализовать адаптивную систему управления скоростью вращения инструментов, а при необходимости и прижимным усилием от ЭВМ, тогда приведенные уравнения являются алгоритмом для программирования. В этом случае выходными сигналами (аргументами) будут электрические сигналы, поступающие в ЭВМ от датчиков крутящих моментов инструментов, а выходными — электрические сигналы на изменение скорости вращения инструментов. ЭВМ в данном случае просчитывает и поддерживает необходимую величину скорости каждого инструмента и тем самым устанавливает требуемую мощность резания из условия наилучшего использования алмаза в алмазосносном слое и равномерного износа каждого инструмента.

Станок для осуществления предлагаемого способа содержит двигатель 3 с шестернями 4 и 5 привода вращения обрабатываемой детали 1, регулируемые двигатели 6-9 с приводными шестернями 10-13, связанные с шестернями 15-17, связанными жестко в свою очередь с рабочими элементами в виде чашек 18-21 соответственно, установленными концентрично с возможностью относительного вращения и разделенными с помощью тел качения.

Периферийный элемент 18 связан жестко с гайкой 22 устройства для выборки зазоров, включающего вторую гайку 23, установленную соосно первой с противоположным направлением винтовой нарезки, а также охватывающую обе гай-

ки 22 и 23, гайку 24, установленную с возможностью вращения относительно внутренних гаек, установленных с возможностью осевого движения. Гайка 23 жестко связана с приводной шестерней 14 и подвижным кольцом подшипника 25. Неподвижное кольцо подшипника 25 установлено в нижнем фланце 26, образующем с втулкой 27 и фланцем 28 корпус, установленный в направляющих станины 29 с возможностью осевого перемещения к центру обрабатываемой сферы до регулируемого упора 30. Приводная шестерня 17 центрального элемента 21 жестко связана с подвижным кольцом подшипника 31. Неподвижное кольцо подшипника 31 установлено во фланце 32, жестко связанном с фланцем 28, который взаимодействует со штоками 33 гидропневмоцилиндров 34, установленных на станине. На станине станка установлен также гидропневмоцилиндр 35 со штоком 36, который взаимодействует с фланцем 28 в плоскости, совпадающей с осями вращения инструмента и детали. Привод гидропневмоцилиндров 34, обеспечивающих прижим инструментов к обрабатываемой поверхности, осуществляется от насоса 37 с баком 38 и предохранительным клапаном 39. Привод гидропневмоцилиндра 35, обеспечивающий перераспределение давления (выравнивание его), осуществляется от насоса 40 с баком 41 и клапаном 42. Подача СОЖ в зону обработки производится через трубу 43.

Станок работает следующим образом.

Обрабатываемая деталь 1 устанавливается в зажимное приспособление (не показано) и приводится во вращение от двигателя 3 через приводные шестерни 4 и 5. Включаются приводные двигатели 6-9 и устанавливаются скорости их вращения, обеспечивающие одинаковую скорость вращения всех элементов инструментов с учетом передаточного отношения приводных шестерен 10, 14, 11, 15, 12, 16, 13-17. Затем включается насос 37 и обеспечивается создание прижимного усилия, приложенного вдоль оси вращения инструмента. При таких режимах обработка ведется до тех пор, пока износ элементов инструмента и обрабатываемой поверхности не приведет к перераспределению давления в плоскости, совпадающей с осями вращения инструмента и детали до заданной оптималь-

ной величины, определяемой, например, наилучшими условиями работы алмаза в алмазосносном слое периферийного элемента 18. Задаваясь, например, давлением P'' в центре обрабатываемой детали, несколько превышающим $[P]$, рекомендуемым для конкретного алмазосносного слоя и $[P^{1m}]$ несколько меньшим в допустимых пределах, что рекомен-

скоростях вращения детали ω_d и инструмента ω_u . Время t_n достижения давления P'' , например, превышающего установленное $[P'']$, определяется из уравнения (14) с учетом того, что

$$\gamma_{u-g}'' = [P''] (K_u + K_g) \omega_u R_c \sin \frac{\Delta}{2}.$$

определим скорости γ_{u-g}'' и γ_{u-g}^{1m} изнашивания, соответствующие этим давлениям при начальном давлении, определяемом из выражения (37). Затем из уравнения (26) определяем необходимое значение произведения силы P_e на 1 - величину смещения ее от оси вращения (симметрии) инструментов при заданных

Выражая $t_u = \frac{2\pi N_u}{\omega_u}$, получим формулу, определяющую количество оборотов инструмента N_u , после которого давление P'' в центре обрабатываемой сферы станет больше требуемых (установленных) давлений $[P'']$ и $[P^{1m}]$. Для этого при заданных скоростях ω_u и ω_d определяют скорости изнашивания в этих точках по формулам

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{u-g}'' &= [P''] (K_u + K_g) \omega_u R_c \sin \frac{\Delta}{2}; \\ \gamma_{u-g}^{1m} &= [P^{1m}] (K_u + K_g) R_c \left(\omega_u \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2} + \omega_g \frac{\sin \frac{\Delta}{2}}{\cos \frac{\Delta}{2}} \right). \end{aligned} \right\} (39)$$

Затем, выражая $t_u = \frac{2\pi N_u}{\omega_u}$, записываем их в виде

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{u-g}'' &= [P''] (K_u + K_g) \frac{2\pi N_u}{t_u} R_c \sin \frac{\Delta}{2}; \\ \gamma_{u-g}^{1m} &= [P^{1m}] (K_u + K_g) R_c \frac{2\pi N_u}{t_u} \left(\frac{\omega_u}{\omega_g} \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2} + \frac{\sin \frac{\Delta}{2}}{\cos \frac{\Delta}{2}} \right). \end{aligned} \right\} (40)$$

Решение уравнений (40) позволяет определить количество оборотов N_u периферийного элемента 18, при котором давления в центре сферы и в точке 1m равны установленным допустимым в результате износа в этих точках. Таким образом, программируя время t_u , определяемое из уравнения (40) с помощью реле времени, реализуется автоматическое выключение насоса 42, создающего необходимый момент силы P_e с помощью гидроцилиндра 35 и штока 36, воздействующего на фланец 28 корпуса. Определив количество оборотов N_u инструмента из уравнений (40), можно реализовать включение насоса 42 с помощью датчика, отсчитывающего количество оборотов инструмента.

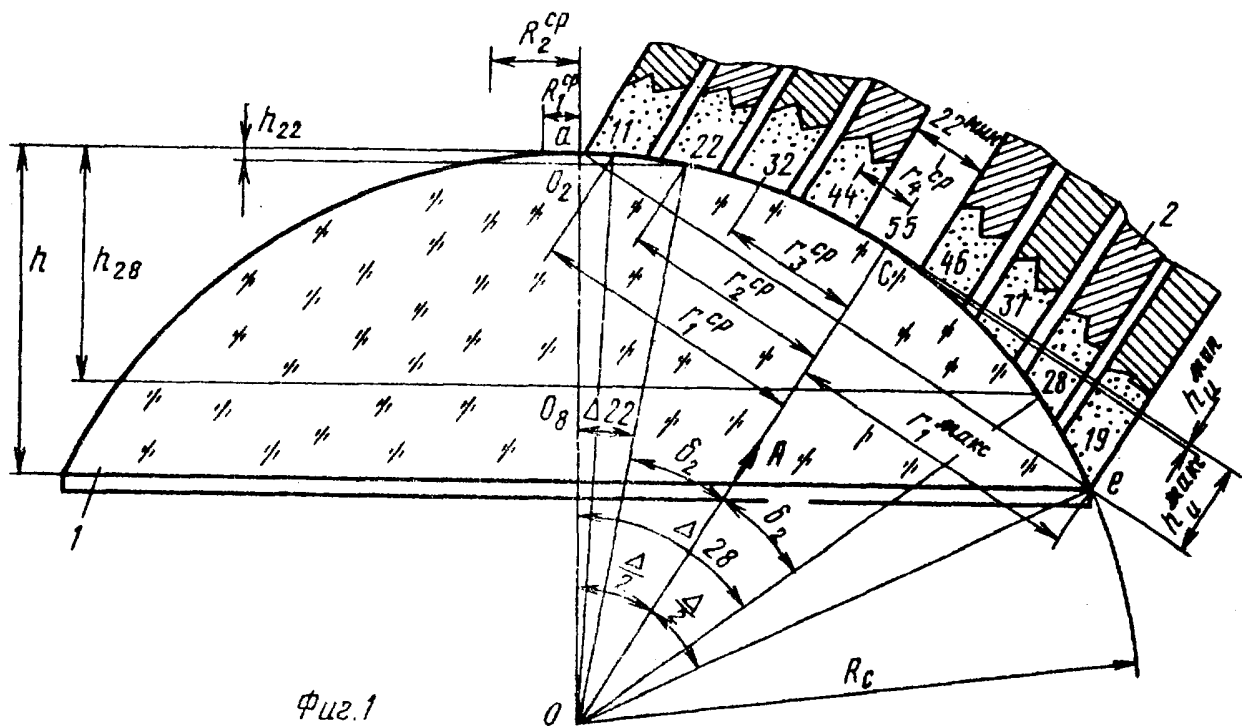
При таких силовых режимах происходит обработка до тех пор, пока на одном из элементов, например на периферийном, крутящий момент станет меньше, чем определяемый по формуле (34) с учетом соотношений (35) - (38).

В этом случае дается команда на увеличение скоростей элементов инструмента в соответствии с формулой (36) и начинается второй этап обработки (фиг. 7, 8). Вместе с увеличением скорости элементов увеличивается и давление, соответствующее максимально возможному. При жестком программировании также из приведенных формул определяется время достижения снижения сил трения в зоне периферийного элемента, например 17, обусловленного износом, и с помощью реле времени дается команда двигателем 6-9 на увеличение скоростей их вращения. В случае адаптивного управления на каждом двигателе или приводной шестерне 14-17 устанавливается датчик крутящего момента и сигналом на включение соответствующих двигателей служит предельное значение крутящих моментов. В качестве такого датчика может быть использовано два токовых реле на валу каждого электродвигателя, ограничива-

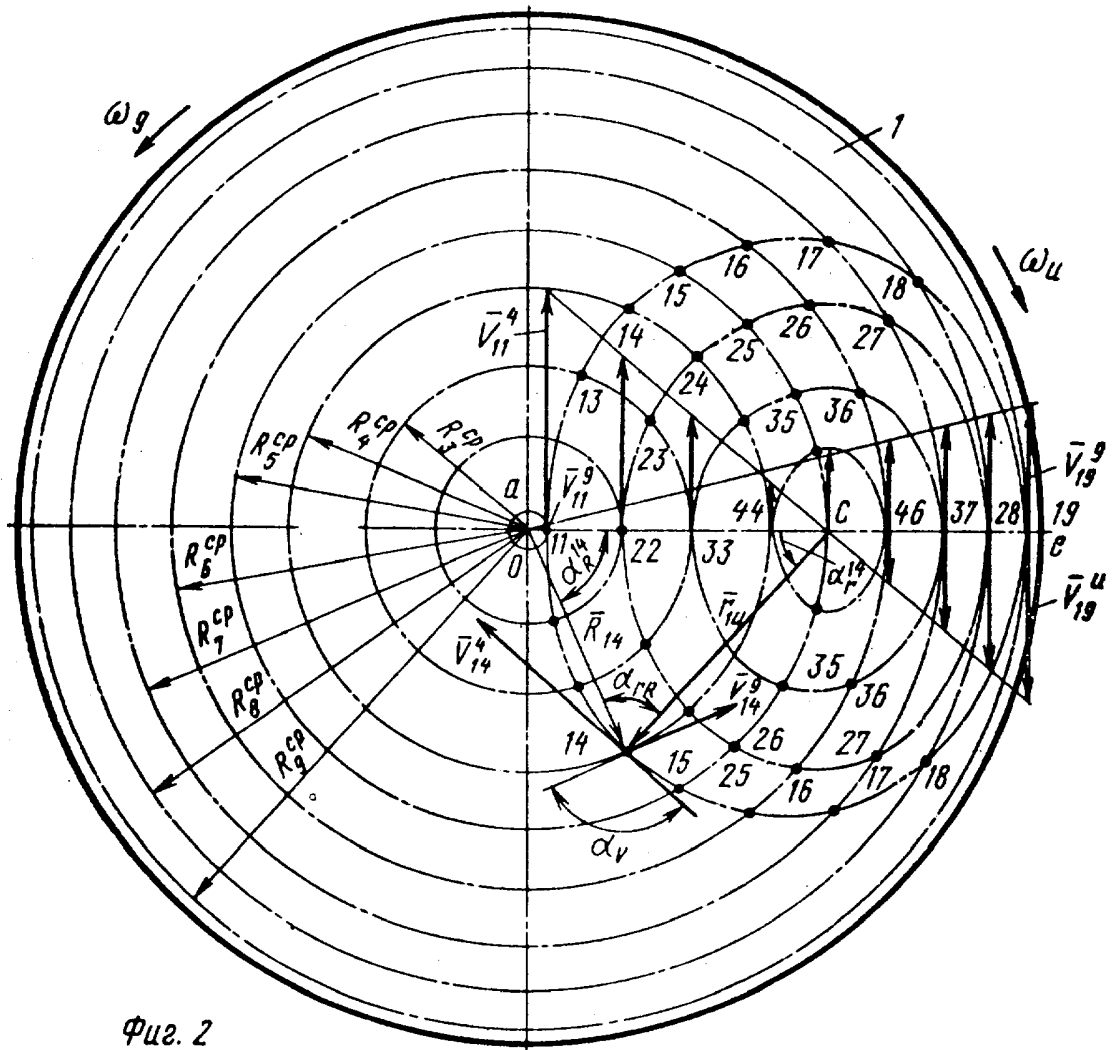
ющие минимальный и максимальный потребляемый ток, пропорциональный крутящему моменту на инструментах.

По достижении $2/3$ времени всего цикла T обработки, устанавливаемого на практике с учетом конкретных условий обработки, давление в цилиндрах 34 уменьшают, увеличивая скорости элементов, с учетом сохранения постоянства мощности сил резания в зонах контакта каждого элемента в соответствии с формулами (34), (35), (36), а также (37), (38). Эти значения скоростей оставляют до полного снятия нагрузки. По достижении времени T дается команда на отключение приводных двигателей 6-9 и отвод инструмента от заготовки. После чего заменяется обрабатываемая деталь и цикл повторяется.

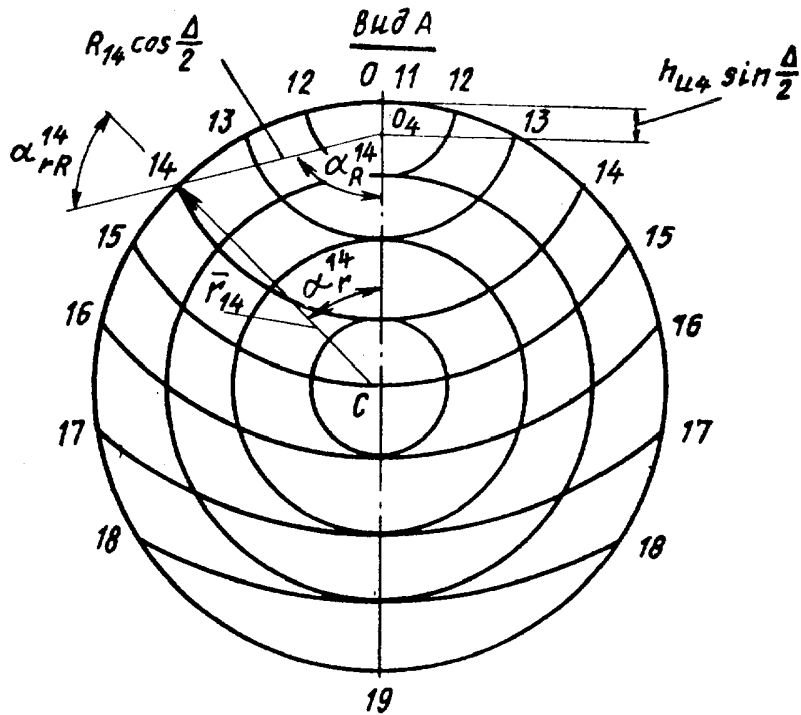
Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я
Способ обработки сферических поверхностей, при котором деталь вращают, а инструмент в виде отдельных рабочих элементов располагают под углом к оси вращения детали, сообщают элементам вращение вокруг своей оси и в процессе обработки изменяют скорость вращения элементов и давление их на деталь, отличающийся тем, что, с целью повышения качества и производительности обработки, рабочие элементы берут в виде чаш со сферическими торцовыми поверхностями, располагают их концентрично по отношению друг к другу, а вращение элементов вокруг своей оси осуществляют в направлении, противоположном вращению детали, при этом регулирование скоростей вращения упомянутых чаш осуществляют автономно.



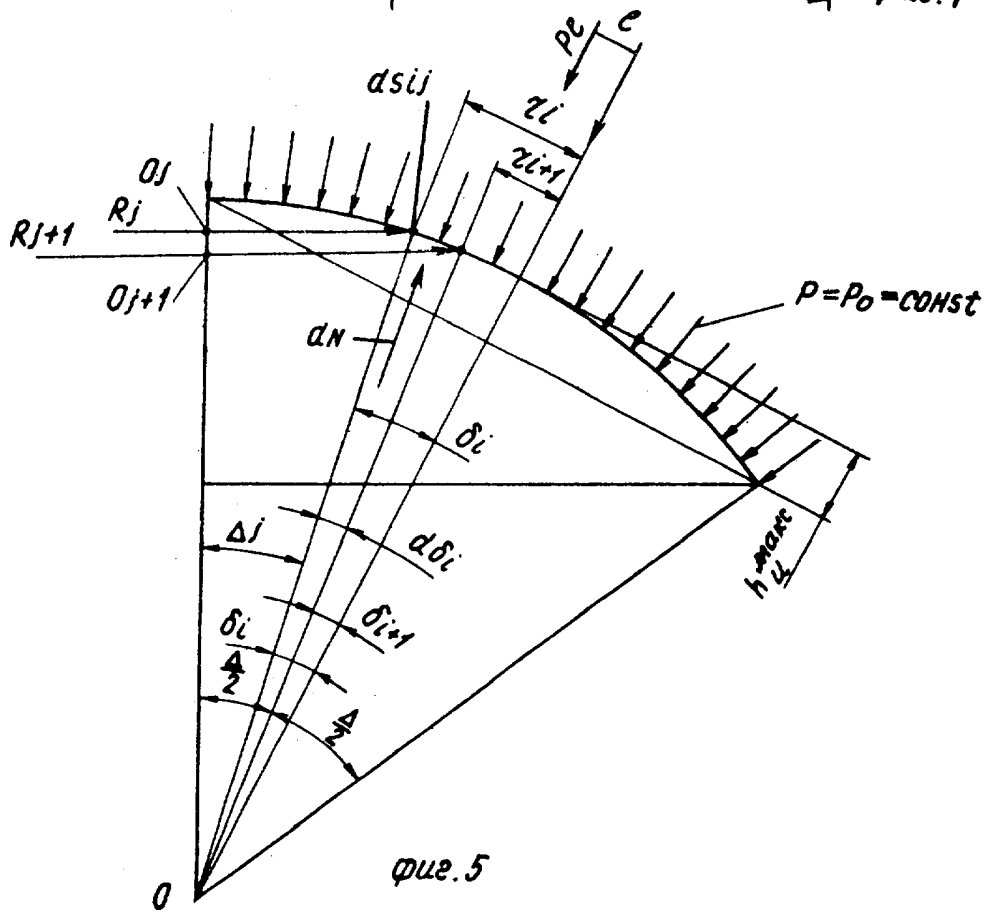
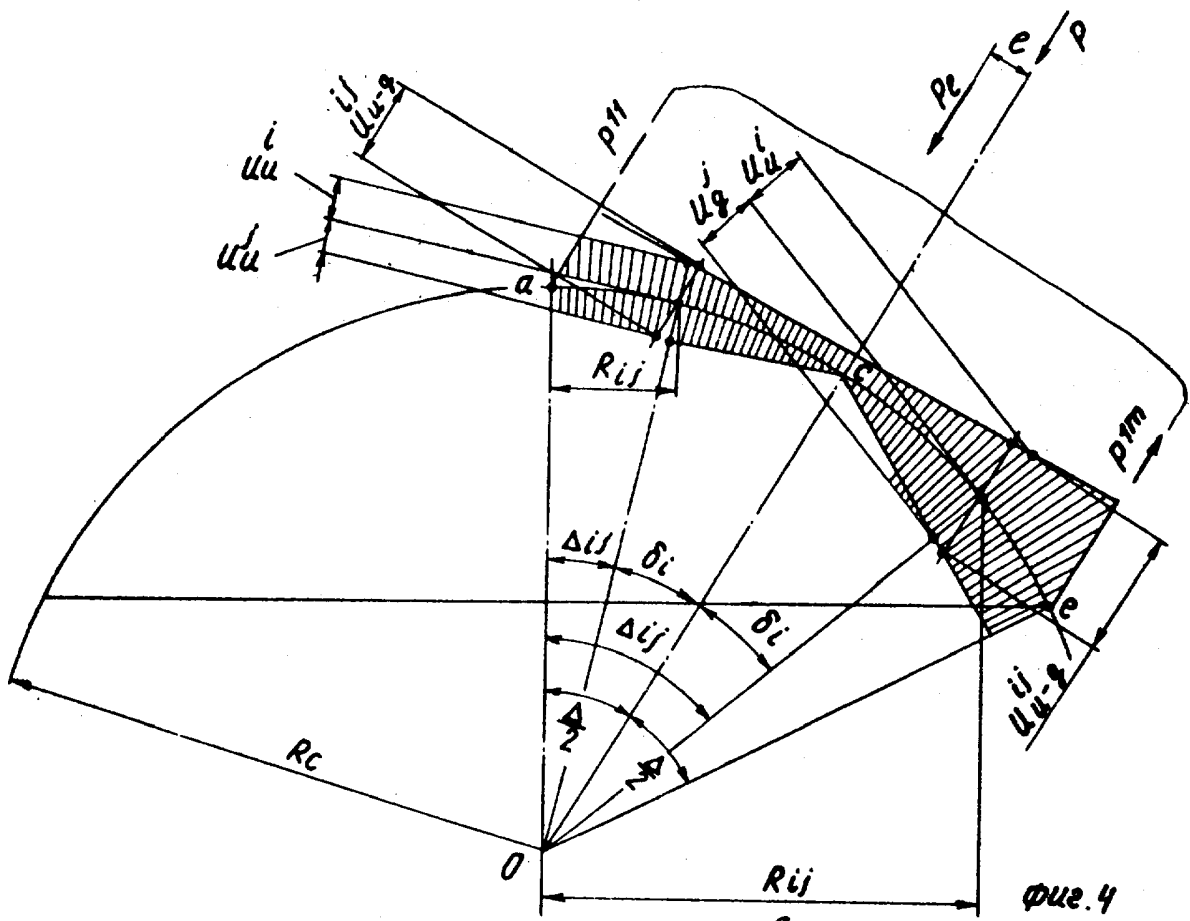
Фиг. 1

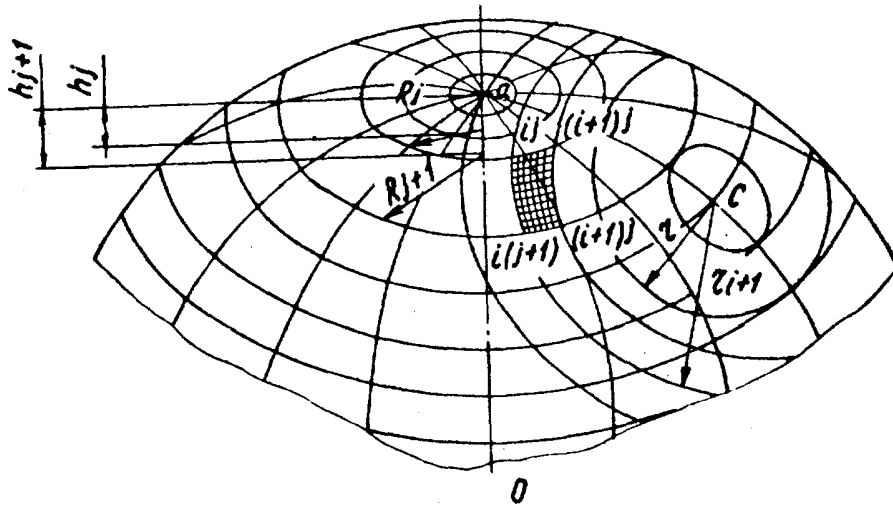


Фиг. 2

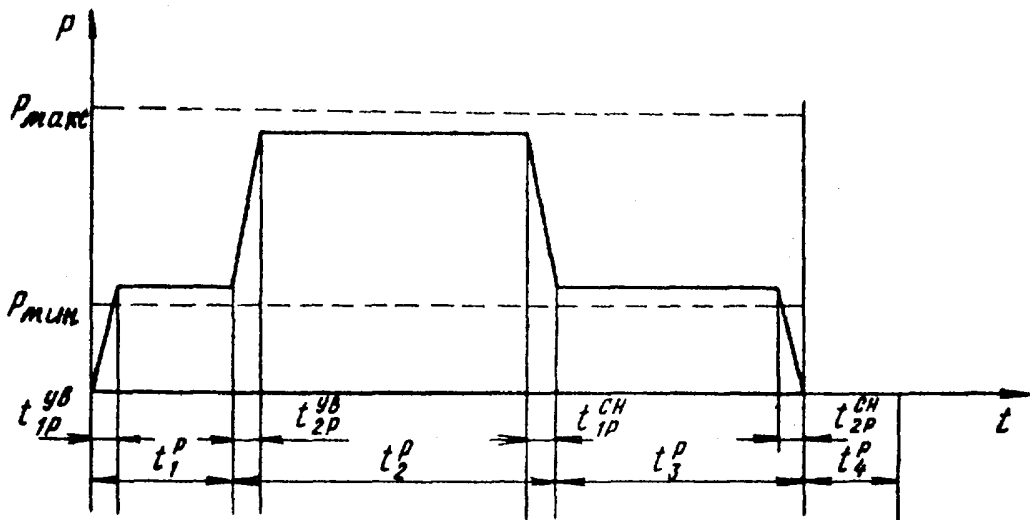


Фиг. 3

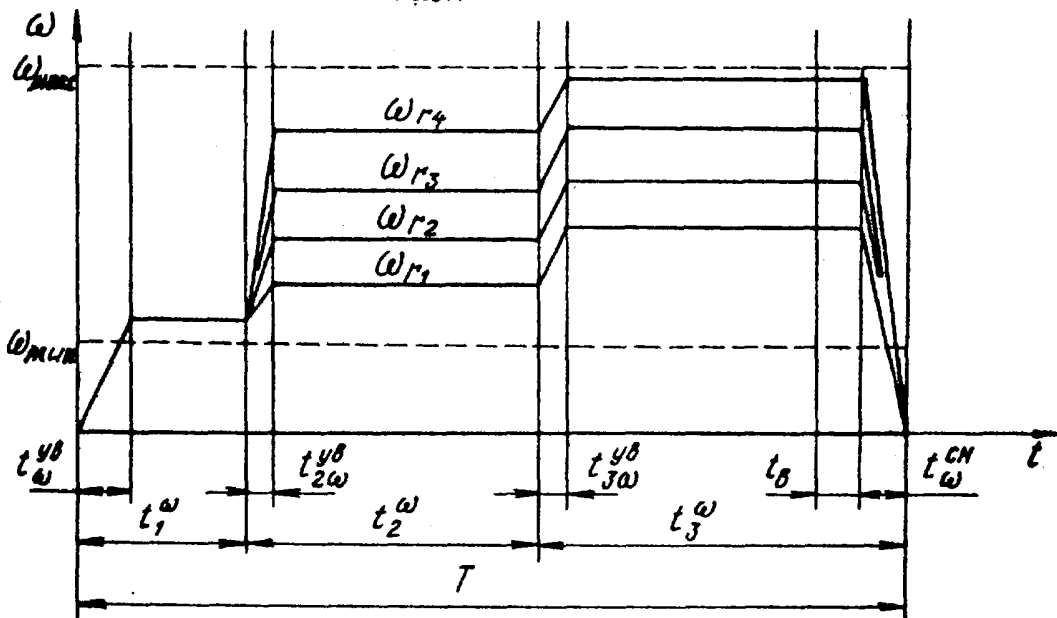




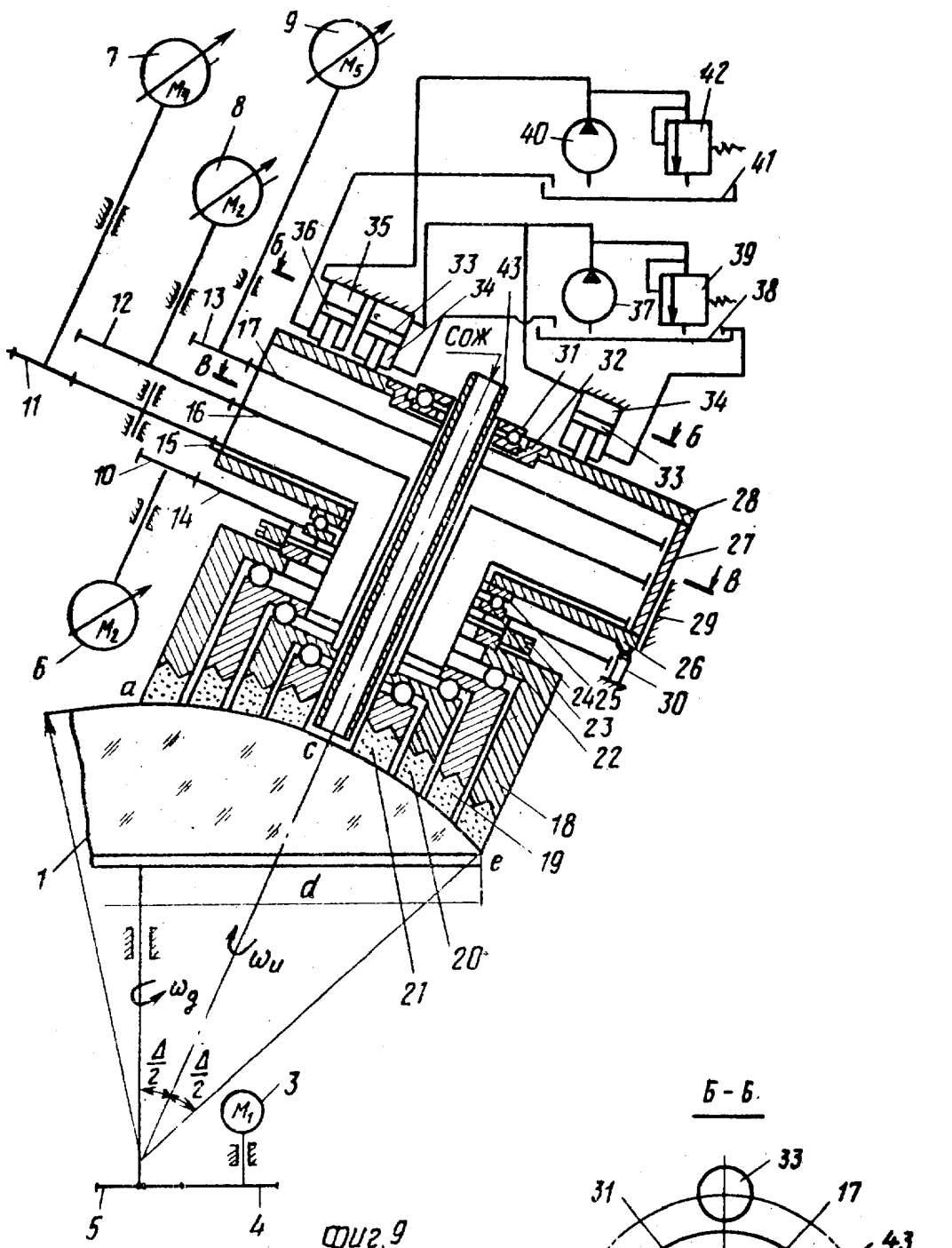
Фиг. 6



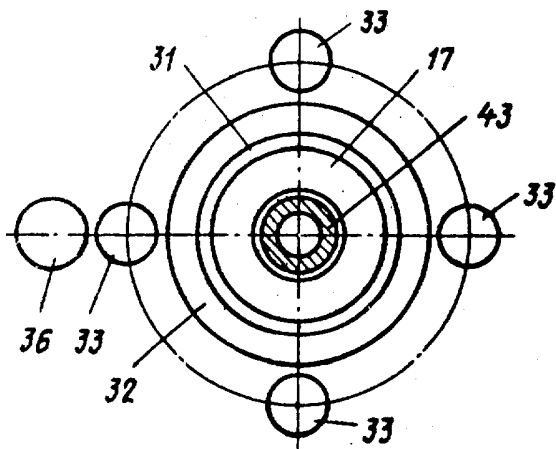
Фиг. 7



Фиг. 8

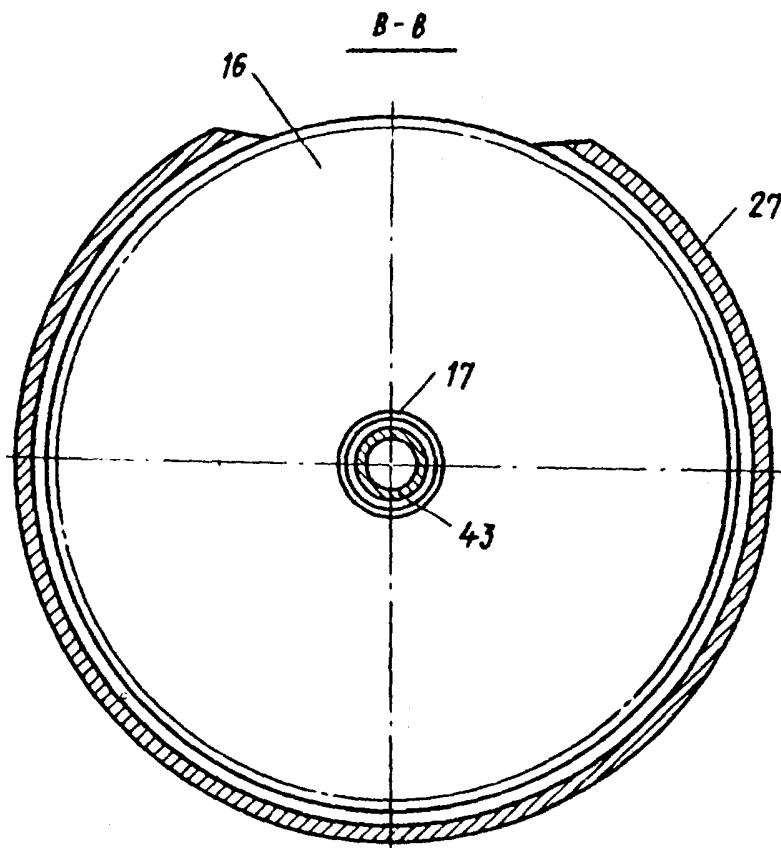


Б-Б.



Фиг. 9

Фиг. 10



Фиг. 11

Редактор С. Патрушева Составитель А. Козлова Корректор А. Тяско
 Техред А. Кравчук

Заказ 3820/13 Тираж 678 Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета СССР
 по делам изобретений и открытий
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Производственно-полиграфическое предприятие, г. Ужгород, ул. Проектная, 4