

УДК 621.9.

КИНЕМАТИКА ПРОЦЕССОВ РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. **Е.М. НАЙДЕНЫШЕВ**, д-р техн. наук, проф. **М.Л. ХЕЙФЕЦ**,
Н.Л. ГРЕЦКИЙ, **С.К. ТОЛСТИКОВ**
 (Полоцкий государственный университет)

Проведен анализ кинематики процессов ротационного точения и растачивания. Получены зависимости для определения углов установки ротационных инструментов, зависящие от размеров режущей пластины, диаметра обрабатываемой поверхности и особенностей кинематики процесса резания.

Небольшие изменения кинематических углов ротационного инструмента в значительной степени определяют динамику и стабильность процесса резания. Влияние подачи на кинематический задний угол α_k довольно ощутимо. Важной особенностью ротационного инструмента является возможность получения высокой чистоты обработанной поверхности на больших подачах.

Поэтому введение подачи в определение основных кинематических зависимостей и кинематических углов ротационного инструмента при токарной обработке внутренних и наружных поверхностей имеет определенный теоретический и практический интерес [1, 2].

Схема точения инструментом с передней поверхностью – наружным конусом – позволяет наилучшим образом разместить подшипниковый узел в оправке и дает предпосылки для обработки внутренних поверхностей деталей с наибольшей глубиной резания.

Ось расточного инструмента разворачивается к плоскости подач H на угол β_y и к плоскости V , перпендикулярной оси детали, на угол φ_y (рис. 1).

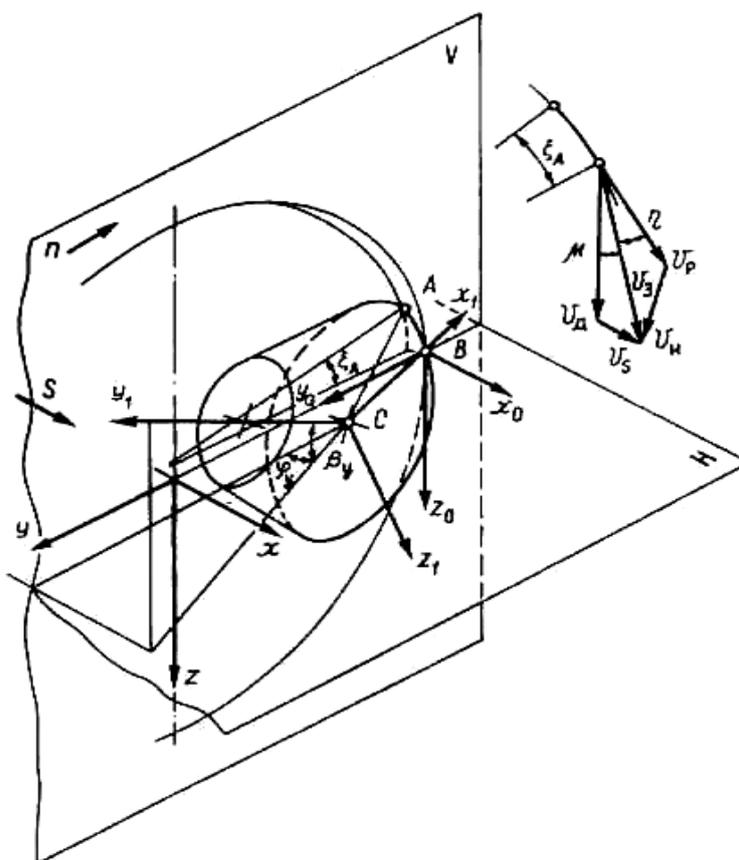


Рис. 1. Схема расчета кинематического коэффициента ротационной обработки

Плоскость, проходящая через ось обрабатываемой детали и вершину резца B , называется определяющей. Рассмотрим инструмент, установленный в рабочее положение так, что определяющая плоскость совпадает с плоскостью подач H . В системе координат $x_0y_0z_0$ (плоскость x_0y_0 совпадает с определяющей,

ось x_0 параллельна оси детали, направление ее противоположно направлению подачи резца, начало координат лежит на обработанной поверхности) координаты центра режущей кромки определяются радиусом резца r и параметрами установки:

$$\begin{aligned} x_{0c} &= -r \sin\psi_B \cos\varphi_y + r \cos\psi_B \sin\varphi_y \sin\beta_y; \\ y_{0c} &= r \sin\psi_B \sin\varphi_y + r \cos\psi_B \cos\varphi_y \sin\beta_y; \\ z_{0c} &= r \cos\psi_B \cos\beta_y, \end{aligned}$$

где $\psi_B = \arctg \frac{\operatorname{tg}\varphi_y}{\sin\beta_y}$ – параметр вершины резца [1].

Построим правую систему координат с началом в точке C – центре режущей кромки. Ось y_1 совпадает с осью резца и направлена в сторону передней поверхности, ось x_1 – с радиусом CB в вершину резца B .

Формулы перехода от системы $x_1y_1z_1$ к системе $x_0y_0z_0$:

$$\begin{cases} x_0 = x_1 (\sin\psi_B \cos\varphi_y - \cos\psi_B \sin\varphi_y \sin\beta_y) + \\ + y_1 \sin\varphi_y \cos\beta_y + z_1 (\cos\psi_B \cos\varphi_y + \sin\psi_B \sin\varphi_y \sin\beta_y) - \\ - r (\sin\psi_B \cos\varphi_y - \cos\psi_B \sin\varphi_y \sin\beta_y), \\ y_0 = -x_1 \operatorname{cosec}\psi_B \sin\varphi_y + y_1 \cos\varphi_y \cos\beta_y + r \operatorname{cosec}\psi_B \sin\varphi_y, \\ z_0 = -x_1 \cos\psi_B \cos\beta_y - y_1 \sin\beta_y + z_1 \sin\psi_B \cos\beta_y + r \cos\psi_B \cos\beta_y, \end{cases}$$

Первое выражение можно упростить:

$$x_0 = x_1 \sin\psi_B \cos\varphi_y \cos^2\beta_y + y_1 \sin\varphi_y \cos\beta_y + z_1 (\cos\psi_B \cos\varphi_y + \sin\psi_B \sin\varphi_y \sin\beta_y) - r \sin\psi_B \cos\varphi_y \cos^2\beta_y.$$

Уравнение обрабатываемой поверхности наиболее просто выглядит в системе xuz : ось x совпадает с осью детали и направлена по направлению ее подачи, плоскость xu совпадает с определяющей плоскостью:

$$y^2 + z^2 = (R - t)^2, \tag{1}$$

где R – радиус растачиваемого отверстия, t – глубина резания.

Формулы перехода от системы xuz к системе $x_0y_0z_0$ и обратно:

$$\begin{cases} x_0 = x \\ y_0 = y + R; \\ z_0 = z \end{cases} \quad \begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 - R. \\ z = z_0 \end{cases}$$

Участок режущей кромки, находящийся в определенный момент времени в работе, определяется углом контакта:

$$\theta_{II} = \theta + \theta_1,$$

где θ – угол контакта, соответствующий дуге контакта активной части режущей кромки (главная режущая кромка) с обрабатываемым материалом; θ_1 – угол контакта, соответствующий дуге контакта части режущей кромки, играющей роль вспомогательного лезвия.

Уравнение активного участка режущей кромки в системе $x_1y_1z_1$:

$$\begin{cases} x_1 = r \cos\theta \\ y_1 = 0 \\ z_1 = -r \sin\theta \end{cases}.$$

В системе xuz :

$$\begin{cases} x = r \cos\theta \sin\psi_B \cos\varphi_y \cos^2\beta_y - r \sin\theta (\cos\psi_B + \sin\psi_B \sin\varphi_y \sin\beta_y) - r \sin\psi_B \cos\varphi_y \cos^2\beta_y \\ y = -R - r \cos\theta \operatorname{cosec}\psi_B \sin\varphi_y + r \operatorname{cosec}\psi_B \sin\varphi_y \\ z = -r \cos\theta \cos\psi_B \cos\beta_y - r \sin\theta \sin\psi_B \cos\beta_y + r \cos\psi_B \cos\beta_y \end{cases}.$$

Совместное решение этого уравнения с уравнением обрабатываемой поверхности приводит к уравнению четвертой степени. Решение его в общем виде весьма трудоемко и дает очень громоздкое выражение для определения угла θ .

Запишем уравнение (1) в виде:

$$y^2 + z^2 = R_3^2, \quad (2)$$

где $R_3 = R - t$.

Отсюда

$$y = \pm \sqrt{R_3^2 - z^2}.$$

Подставив значение z из (2) и проведя преобразования, получим:

$$y = \sqrt{R_3^2 - r^2 \cos^2 \beta_y (\cos \psi_B - \cos \theta \cos \psi_B - \sin \theta \sin \psi_B)^2}. \quad (3)$$

Проанализируем многочлен, заключенный в скобках. Из неравенств

$$\cos \psi_B - \cos \theta \cos \psi_B - \sin \theta \sin \psi_B < \sin \theta \sin \psi_B;$$

$$-\cos \psi_B + \cos \theta \cos \psi_B + \sin \theta \sin \psi_B < \sin \theta \sin \psi_B$$

следует:

- 1) абсолютная величина многочлена меньше единицы;
- 2) меньшую относительную погрешность будем иметь, отбрасывая при упрощении уравнения (3) z , а не его часть $-r \sin \theta \sin \psi_B \cos \beta_y$.

При $R/r \geq 5$ для всех практически возможных значений параметров установки φ_y и β_y с погрешностью менее 0,5 % можно записать $y = -R_3$.

Отсюда

$$\cos \theta = \frac{r \operatorname{cosec} \psi_B \sin \varphi_y - t}{r \operatorname{cosec} \psi_B \sin \varphi_y} = 1 - \frac{t}{r \operatorname{cosec} \psi_B \sin \varphi_y}. \quad (4)$$

Угол контакта θ_1 с достаточной точностью определяется формулой [1]:

$$\sin \theta_1 = \frac{S \cos \varphi}{2r \cos \psi_B}.$$

При ротационном точении и растачивании режущая часть инструмента совершает три движения: главное, вспомогательное и вращение относительно собственной оси.

Вектор скорости резания \vec{V}_H , определяющий относительное движение инструмента и заготовки, равен векторной сумме:

$$\vec{V}_H = \vec{V}_o + \vec{V}_s - \vec{V}_p,$$

где \vec{V}_o – вектор скорости главного движения; \vec{V}_s – вектор движения подачи; \vec{V}_p – вектор скорости вращения инструмента.

Скорость резания для вращающегося инструмента – величина переменная как по модулю, так и по направлению для различных точек режущей кромки.

Обозначив векторную сумму скоростей главного движения и движения подачи $\vec{V}_z = \vec{V}_o + \vec{V}_s$, получим выражение для модуля скорости резания ротационного инструмента в точке M :

$$V_{uM} = \sqrt{V_{zM}^2 + V_{pM}^2 - 2V_{zM}V_{pM} \cos(\vec{V}_{zM}\vec{V}_{pM})}.$$

Угол между векторами \vec{V}_{zM} и \vec{V}_{pM} определим как угол между касательной к винтовой линии в точке M и касательной к режущей кромке в данной точке.

Единичный вектор скорости вращения инструмента в системе $x_1y_1z_1$:

- в точке M :

$$\vec{v}_p = \vec{i}_1 \sin \theta_M + \vec{k}_1 \cos \theta_M;$$

- в точке B

$$\bar{v}_{pB} = \bar{k}_1.$$

В системе $x_0y_0z_0$:

$$\begin{aligned} \bar{v}_p = & \bar{i}_0[\sin\theta_M(\sin\psi_B\cos\varphi_y - \cos\psi_B\sin\varphi_y\sin\beta_y) + \cos\theta_M(\cos\psi_B\cos\varphi_y - \sin\psi_B\sin\varphi_y\sin\beta_y)] - \\ & - \bar{j}_0\sin\theta_M\operatorname{cosec}\psi_B\sin\varphi_y + \bar{k}_0(\sin\theta_M\cos\psi_B\cos\beta_y + \cos\theta_M\sin\psi_B\cos\beta_y) = \bar{i}_0[\cos(\psi_B - \theta_M)\cos\varphi_y + \\ & + \sin(\psi_B - \theta_M)\sin\varphi_y\sin\beta_y] - \bar{j}_0\sin\theta_M\operatorname{cosec}\psi_B\sin\varphi_y + \bar{k}_0\sin(\psi_B - \theta_M)\cos\beta_y. \end{aligned}$$

Для точки B :

$$\bar{v}_{pB} = \bar{i}_0(\cos\psi_B\cos\varphi_y + \sin\psi_B\sin\varphi_y\sin\beta_y) + \bar{k}_0\sin\psi_B\cos\beta_y.$$

Единичный вектор скорости вращения детали в системе $x_0y_0z_0$

$$\bar{v}_\omega = -\bar{j}_0\sin\xi_M + \bar{k}_0\cos\xi_M,$$

где ξ_M – угол между радиусами детали в точки B и M .

Для точки B :

$$\bar{v}_{\omega B} = \bar{k}_0.$$

Матрица преобразования единичного вектора $\bar{v}_{\omega B}$ в единичный вектор \bar{v}_3 :

$$BA = \begin{bmatrix} \cos\mu & 0 & \sin\mu \\ \sin\mu\sin\xi_M & \cos\xi_M & -\cos\mu\sin\xi_M \\ -\sin\mu\cos\xi_M & \sin\xi_M & \cos\mu\cos\xi_M \end{bmatrix}.$$

Здесь $\mu = \arctg \frac{S}{2\pi R_M}$ – угол подъема винтовой линии.

В системе $x_0y_0z_0$:

$$\bar{v}_3 = \bar{i}_0\sin\mu - \bar{j}_0\cos\mu\sin\xi_M + \bar{k}_0\cos\mu\cos\xi_M.$$

Для точки B :

$$\bar{v}_{3B} = \bar{i}_0\sin\mu + \bar{k}_0\cos\mu.$$

Угол между векторами \bar{v}_3 и \bar{v}_p :

$$\begin{aligned} \cos\eta = \bar{v}_p \cdot \bar{v}_3 = & \sin\mu[\cos(\psi_B - \theta_M)\cos\varphi_y + \sin(\psi_B - \theta_M)\sin\varphi_y\sin\beta_y + \\ & + \cos\mu\sin\xi_M\sin\theta_M\operatorname{cosec}\psi_B\sin\varphi_y + \cos\mu\cos\xi_M\sin(\psi_B - \theta_M)\cos\beta_y]. \end{aligned}$$

Для точки B :

$$\cos\eta_B = \sin\mu(\cos\psi_B\cos\varphi_y + \sin\psi_B\sin\varphi_y\sin\beta_y) + \cos\mu\sin\psi_B\cos\beta_y.$$

Пренебрегая вектором подачи, получили

$$\begin{aligned} \cos\eta = \bar{v}_p \cdot \bar{v}_\omega = & \sin\xi_M\sin\theta_M\operatorname{cosec}\psi_B\sin\varphi_y + \cos\xi_M\sin(\psi_B - \theta_M)\cos\beta_y; \\ \cos\eta_B = & \sin\psi_B\cos\beta_y. \end{aligned}$$

Модуль скорости резания:

$$V_{uM} = k_{1M}V_{3M} \quad \text{или} \quad V_{uM} = k_1V_{\omega M},$$

где $k_1 = \sqrt{1+k^2-2k\cos\eta}$; $k = \frac{V_3}{V_p}$ или $k = \frac{V_p}{V_\omega}$, пренебрегая V_s .

Работа ротационного резца (вторая схема, обратное резание) аналогична работе тороидного фрикционного вариатора. На задней поверхности резца, контактирующей с поверхностью резания вследствие

упругих и пластических деформаций обрабатываемого материала, имеется полюс качения – точка P , в которой отсутствует проскальзывание резца относительно поверхности резания в направлении вращения резца. Для полюса качения $K = \cos\eta_p$. Если для упрощения принять, что точка P находится па режущем лезвии, то

$$K = \sin\mu[\cos(\psi_B - \theta_p)\cos\varphi_y + \sin(\psi_B - \theta_p)\sin\varphi_y\sin\beta_y] + \cos\mu\sin\xi_p\sin\theta_p\operatorname{cosec}\psi_B\sin\varphi_y + \cos\mu\cos\xi_p\sin(\psi_B - \theta_p)\cos\beta_y. \quad (5)$$

Пренебрегая подачей, получим

$$K = \sin\xi_p\sin\theta_p\operatorname{cosec}\psi_B\sin\varphi_y + \cos\xi_p\sin(\psi_B - \theta_p)\cos\beta_y. \quad (6)$$

Если принять, что точка P находится в вершине резца B , то

$$K = \sin\psi_B\cos\beta_y. \quad (7)$$

Экспериментальная проверка полученных аналитических зависимостей проведена при растачивании стальных горячекатаных труб твердосплавным ротационным резцом Т15К6 на токарно-винторезном станке 16К20 [3]. Резец крепился в специальной расточной оправке на суппорте станка. Корпус оправки устанавливался вместо снятого резцедержателя на верхних салазках суппорта, поворот верхних салазок и поворот оправки в корпусе позволяли получать требуемые изменения параметров установки резца φ_y и β_y . Резец устанавливался вершиной B на высоте центров, чем обеспечивалось совпадение определяющей плоскости с плоскостью подач, от которой производились отсчеты углов поворота оправки η и разворота верхних салазок суппорта φ_k . Последние рассчитывались исходя из требуемых углов установки φ_y и β_y .

При исследовании зависимости коэффициента K от параметров режима резания ν , S и t эксперименты проводились при одних углах установки φ_y и β_y и углах заточки, обеспечивающих устойчивое резание.

При исследовании влияния параметров установки на K углы заточки менялись для обеспечения устойчивого резания. Режимы резания при этом оставались постоянными, изменялась лишь скорость резания в весьма незначительных пределах (3...5 %).

Обороты резца измерялись центробежным тахометром с диапазоном измерения 25...10000 об/мин через гибкий тросик. Относительная погрешность показаний тахометра 0,5...1 % на всем диапазоне измерения. Обороты шпинделя станка измерялись в процессе эксперимента тем же тахометром, что исключало погрешность от неточности передаточного отношения коробки скорос-

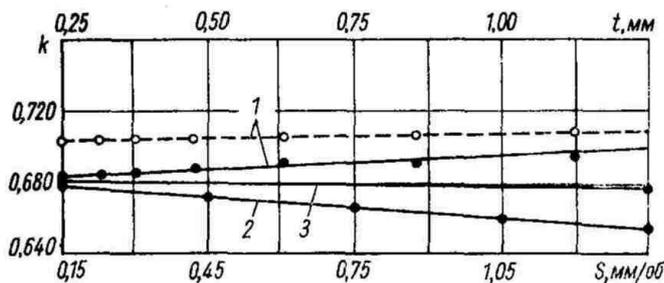


Рис. 2. Зависимость кинематического коэффициента от параметров режима резания:

$$K = f(S) \text{ (1), } f(t) \text{ (2) и } f(v) \text{ (3), } \nu = 45 \dots 380 \text{ м/мин; светлые точки – расчет; темные – эксперимент}$$

тей станка и нежесткости характеристики электродвигателя, а также уменьшало кинематическую погрешность определения K , связанную с погрешностью измерения.

На рис. 2, 3 приведены зависимости кинематического коэффициента от режима резания и параметров установки ротационного инструмента. Уменьшение экспериментального значения кинематического коэффициента по сравнению с расчетным объясняется влиянием угла θ_p . Этим же следует объяснить и уменьшение K с увеличением глубины резания. В этом случае действуют два фактора – смещение полюса качения P от режущей кромки вдоль образующей заднего конуса увеличивает скорость вращения инструмента (при обточке в большей степени, чем при расточке). С увеличением глубины резания увеличиваются угол кон-

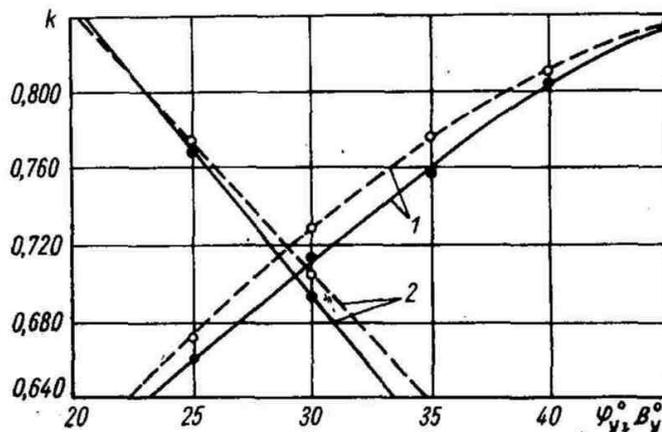


Рис. 3. Зависимость кинематического коэффициента от параметров установки ротационного инструмента:

$$K = f(\varphi_y) \text{ (1) и } f(\beta_y) \text{ (2); светлые точки – расчет; темные – эксперимент}$$

такта активной части режущей кромки θ и угол θ_p (при расточке в большей степени, чем при обработке наружных поверхностей). Очевидно, влияние угла θ_p является преобладающим, отсюда и уменьшение кинематического коэффициента с увеличением глубины резания.

Кинематика ротационного резания в значительной степени определяется углами установки инструмента β и φ . Углы установки непосредственно влияют на процесс образования стружки, прямо и косвенно – на тепловыделение и теплообмен в процессе резания, изнашивание инструмента и возникновение вибраций [3, 4].

При изготовлении расточного инструмента выбранное значение углов установки можно получить, развернув ось расточки под вставку на угол $(90 - \varphi_0)^\circ$ к геометрической оси O (рис. 4 и 5) инструмента в плоскости S , параллельной оси инструмента. Положение плоскости S определяется расстоянием ее от оси инструмента H и углом наклона к определяющей плоскости α , которой называется плоскость, проходящая через вершину резца и ось детали [4].

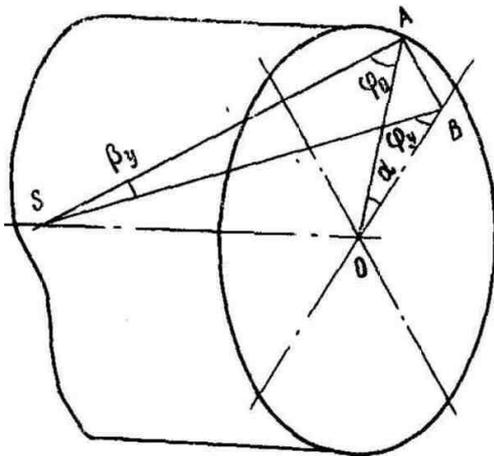


Рис. 4. Схема определения углов β и φ_0

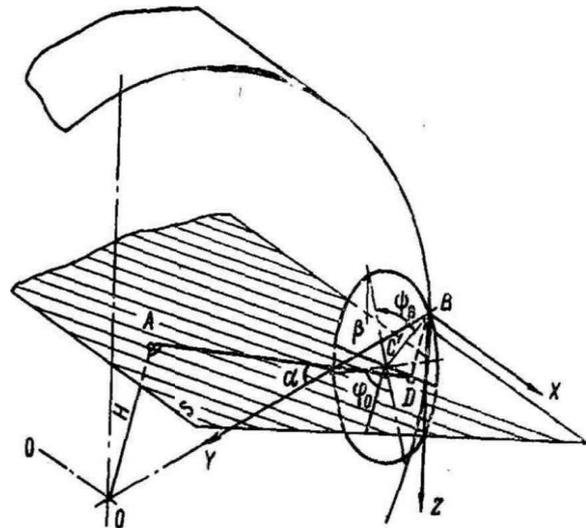


Рис. 5. Положение режущей кромки ротационного инструмента при расточке отверстия

Для определения углов φ_0 (угол между перпендикуляром к проекции оси O на плоскость S и осью расточки под вставку) и α условно примем диаметр инструмента таким, чтобы плоскость S проходила через ось инструмента O . Из треугольников SAO , SBO и ABO (см. рис. 4)

$$\sin\varphi_0 = \sin\varphi\cos\beta; \quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{\operatorname{tg}\beta}{\cos\varphi}.$$

При любом другом диаметре инструмента, для того чтобы вершина резца находилась в этой же определяющей плоскости, плоскость S должна быть смещена от оси инструмента OO на величину H . Эта величина определяется вылетом резца l (при расточке отверстий насадным и концевым инструментом $l = 0,5 D$, где D – диаметр растачиваемого отверстия), радиусом инструмента r , углами установки β и φ , углом ψ_B и углом α . Здесь ψ_B – параметр вершины инструмента:

$$\operatorname{tg}\psi_B = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\sin\beta}. \tag{8}$$

Рассмотрим инструмент в системе координат XYZ (см. рис. 5).

Плоскость XY совпадает с определяющей плоскостью. Ось X параллельна оси обрабатываемой детали. Вершина инструмента B находится в начале координат.

Повернем инструмент в рабочее положение из исходного на углы β и φ .

Исходное положение инструмента – режущая кромка – находится в плоскости XZ .

Координаты центра режущей кромки: $-r\sin\psi_B$; 0 ; $r\cos\psi_B$.

Уравнение оси инструмента в проектирующих плоскостях:

$$\left. \begin{aligned} x &= -r\sin\psi_B \\ z &= r\cos\psi_B \end{aligned} \right\}.$$

Матрица преобразования пространства

$$AB = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi\cos\beta & \sin\varphi\sin\beta \\ -\sin\varphi & \cos\varphi\cos\beta & \cos\varphi\sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}.$$

Уравнение рабочего положения оси резца:

$$\frac{x' - x'_C}{\sin\varphi\cos\beta} = \frac{y' - y'_C}{\cos\varphi\cos\beta} = \frac{z' - z'_C}{-\sin\beta}.$$

Уравнение плоскости S :

$$\frac{y' - y'_C}{\cos\varphi\cos\beta} = \frac{z' - z'_C}{-\sin\beta},$$

$$y'\sin\beta + z'\cos\varphi\cos\beta - (y'_C\sin\beta + z'_C\cos\varphi\cos\beta) = 0.$$

Координаты центра режущей кромки:

$$y'_C = r\sin\psi_B\sin\varphi + r\cos\psi_B\cos\varphi\sin\beta, \quad z'_C = r\cos\psi_B\cos\beta.$$

Расстояние от начала координат до плоскости S :

$$h = \frac{y'_C\sin\beta + z'_C\cos\varphi\cos\beta}{\sqrt{\sin^2\beta + \cos^2\varphi\cos^2\beta}} = \frac{r(\sin\psi_B\sin\varphi\sin\beta + \cos\psi_B\cos\varphi\sin^2\beta + \cos\psi_B\cos\varphi\cos^2\beta)}{\sqrt{\sin^2\beta + \cos^2\varphi\cos^2\beta}}.$$

После преобразований и подстановок имеем

$$h = r\cos\psi_B \frac{\sin\alpha}{\cos\varphi\sin\beta}.$$

Задавшись вылетом инструмента l (расстоянием от центра оправки до вершины инструмента), найдем расстояние между осью оправки и осью расточки под вставку, равное расстоянию между осью оправки и плоскостью S :

$$H = l\sin\alpha - h,$$

$$H = \left(l - \frac{r\cos\psi_B}{\cos\varphi\sin\beta} \right) \sin\alpha.$$

Расточив оправку по параметрам H и φ_0 , получаем требуемые углы установки ротационного инструмента β и φ при выбранном диаметре и вылете l .

Настройка рассчитанного по данным формулам инструмента обеспечивает требуемый размер растачиваемого отверстия. Изменение диаметра резца при переточках весьма несущественно скажется на параметрах β и φ [4].

Анализ кинематики процессов ротационного точения и растачивания позволил получить зависимости для определения углов установки ротационных инструментов, зависящие от размеров режущей пластины и обрабатываемой поверхности, а также от кинематического коэффициента равного отношению скоростей главного движения и дополнительного перемещения режущей кромки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов Е.Г., Пашкевич М.Ф. Теоретические аспекты проблемы ротационного резания металлов с большими глубинами // Докл. АН БССР. – 1972. – Т. 12, № 3. – С. 217 – 220.
2. Обработка износостойких покрытий / Под общ. ред. Ж.А. Мрочека. – Мн.: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
3. Найденышев Е.М. Анализ кинематики ротационного растачивания // Весці АН БССР, Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1973. – № 2. – С. 49 – 55.
4. Найденышев Е.М. Установка ротационных резцов при растачивании отверстий // Доклады АН БССР. – 1971. – Т. XV, № 10. – С. 910 – 912.