

## Теоретическое определение кинематических углов перовых сверл

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»  
Киевский авиационный техникум*

Рассмотрены вопросы профилирования кинематических геометрических параметров перовых сверл, приведено аналитическое решение задачи определения передних и задних углов перовых сверл в процессе резания.

**Ключевые слова:** перовые сверла, кинематические углы, формообразующие поверхности, криволинейные кромки, передние и задние углы.

В статье приведена теория определения кинематических геометрических параметров перовых сверл вдоль режущей кромки, исследуется их измерения в процессе резания с учетом особенностей процесса сверления.

Процесс классификации основных случаев резания производится по следующим признакам: по форме участков режущих кромок; по ориентации режущей кромки относительно вектора скорости резания; по характеру контактных деформаций стружки; по непрерывности процесса стружкообразования.

Процесс резания для операций сверления является общим случаем косоугольного резания в отличие от прямоугольного, для которого вектор скорости резания не перпендикулярен режущей кромке и образует некоторый угол  $\eta$  с плоскостью, нормальной к режущей кромке. Вследствие этого вектор скорости сдвига  $U$  в зоне стружкообразования также не лежит в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке

Для свободного косоугольного резания векторы скорости резания -  $V$ , скорости сдвига -  $U$  и скорости схода стружки -  $W$  лежат в одной плоскости, которая является плоскостью стружкообразования -  $P$  ( $OABC$ ). Плоскость -  $P_1$  ( $OA_1B_1C_1$ ) является нормальной плоскостью по отношению к режущей кромке и на ней лежат скорости -  $V_N, W_N, U_N$ . По теории угол резания ( $\delta$ ) является углом между векторами скорости резания -  $V$  и скорости сдвига стружки  $U$  (Рис.1, 2).

При косоугольном резании этот угол в значительной степени зависит от угла наклона режущей кромки  $\lambda$ , и угла отклонения стружки  $\eta$ . Угол между направлениям схода стружки и нормалью к режущей кромке, измеренной в плоскости передней поверхности резца, в этом случае равен [1]:

$$\cos \eta = \frac{v_c}{v \cdot \cos \lambda} \quad (1)$$

С помощью этого равенства действительный (эффективный) передний угол -  $\gamma_e$  определяется, для косоугольного резания, уравнением:

$$\sin \gamma_e = \sin \eta \cdot \sin \lambda + \cos \eta \cdot \cos \lambda \cdot \sin \gamma_N \quad (2)$$

Нормальный передний угол -  $\gamma_N$ , передний угол в плоскости вектора скорости  $\gamma_V$  и угол наклона режущей кромки -  $\lambda$  связаны следующей зависимостью:

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \operatorname{tg} \gamma_V \cdot \cos \lambda \quad (3)$$

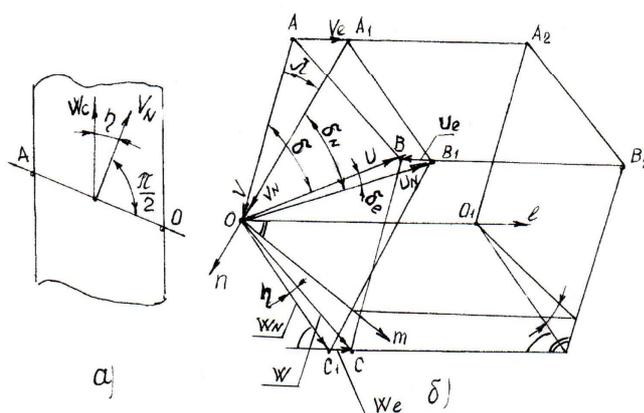


Рис. 1 Схема скоростей при косоугольном резании  
 а) упрощенная схема косоугольного резания б) схема скоростей:  
 $P(ABCO)$  – плоскость стружкообразования;  $P_1(A_1B_1C_1O)$  – плоскость  
 стружкообразования, нормальная к режущей кромке  $l$ ;  $V$  – вектор скорости  
 резания;  $V_N$  – вектор скорости резания, нормальный к режущей кромке;  
 $W$  – вектор скорости стружки;  $\lambda$  – угол наклона режущей кромки;  $\delta$  – угол сдвига  
 стружки;  $\gamma$  – передний угол инструмента;  $\eta$  – угол отклонения стружки.

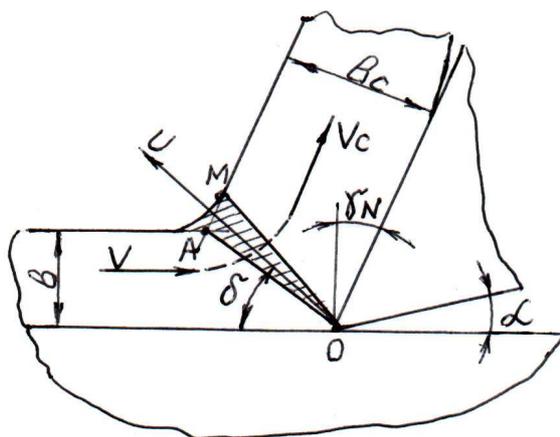


Рис.2. Схема стружкообразования, показывающая угол сдвига  $\delta$ ,  
 относительно границ стружкообразования OAM и направления схода:  $W_c$  -стружки;  
 $b$  – глубина резания;  $b_c$  – ширина стружки

Для ранее проведенных исследований для резцов с прямолинейной режущей кромкой была принята упрощенная зависимость для угла схода стружки

$$\eta \approx \lambda \quad (4)$$

Однако для условий косоугольного резания композиционных материалов эту зависимость, принято считать такой  $\eta = k \cdot \lambda$ , где значение  $k=0,80-0,9$  в зависимости от марки обрабатываемого материала, (так для углепластиков, боропластиков и стеклопластиков он ближе к 0,8, а для органопластиков этот коэффициент ближе к 0,9).[2]

Учитывая незначительное влияние коэффициента,  $k$  принимает упрощенную зависимость  $\eta = \lambda$ , поэтому уравнение (2) записывается в таком виде:

$$\sin \gamma_e = \sin^2 \lambda + \cos^2 \lambda \cdot \sin \gamma_N \quad (5)$$

При сверлении стандартным сверлом снятие материала происходит в двух четко различаемых зонах резания, а именно у главных режущих кромок и у поперечной режущей кромки. В данной работе предлагается специальное сверло, отличающееся от стандартного сверла способом заточки рис. 3.

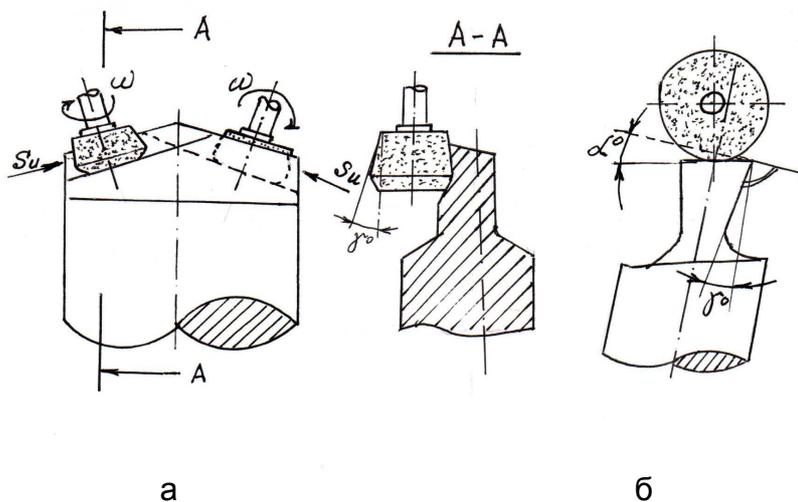


Рис. 3 Схема заточки (а) передних –  $\gamma^\circ$ , (б) задних –  $\alpha^\circ$  углов специального перового сверла, где  $S_u$  - подача формообразующего абразивного инструмента

Предложенное сверло должно удовлетворять следующим требованиям: 1) способным моделировать процесс резания стандартным сверлом; 2) обеспечивать простоту заточки геометрических параметров сверла; 3) сверло можно изготавливать как из цельного прутка инструментального материала, так и со вставной режущей твёрдосплавной пластины.

Для определения действительных (кинематических) геометрических углов инструмента необходимо задаться исходной координатной поверхностью отсчета положения передней и задней поверхностей и режущих кромок, а также направлением измерения рабочих углов. Для передних углов при косоугольном резании наиболее часто задается и легко поддается измерению нормальный передний угол  $\gamma_N$ . Однако, важным для процесса резания является эффективный передний угол -  $\gamma_e$  его необходимо рассчитывать в направлении схода стружки [3].

На практике, для стандартных сверл рассчитывается передний угол -  $\gamma_p$ , измеряемый в плоскости винтовой заточки инструмента, он задается в силу простоты его измерения. В нашем случае для специального сверла, предложенный метод шлифования, обуславливает применение вместо угла  $\gamma_p$ , так называемого условного переднего угла -  $\gamma_{ap}$  в плоскости, параллельной оси сверла. Для специального перового сверла был разработан метод определения в

процессе резания геометрических параметров вдоль режущих кромок, который и излагается ниже.

Условный передний угол в плоскости параллельной оси -  $\gamma_{ap}$  является углом, образуемым от пересечения передней поверхности с плоскостью, перпендикулярной оси X, и прямой линией, параллельной оси сверла, проходящей через рассматриваемую точку режущей кромки (рис. 4). [4]

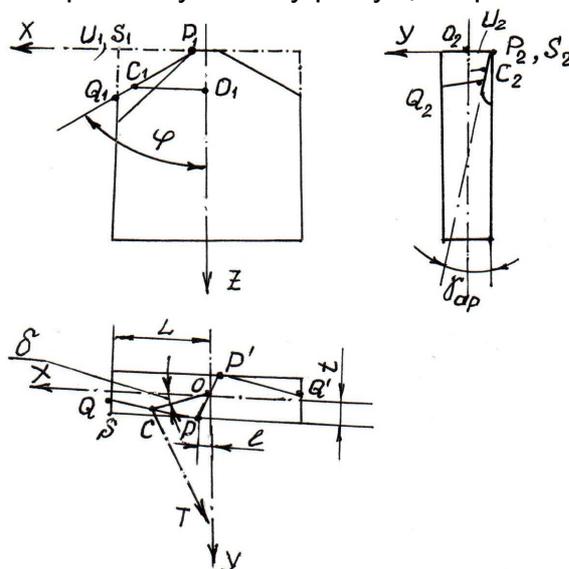


Рис. 4. Режущая часть специального сверла и его геометрические параметры, где  $\gamma_{ap}$  – условный передний и  $\alpha_{ap}$  – условный задний углы в плоскости, параллельной оси сверла

Для режущей кромки, показанной на рис. 4, эта зависимость имеет вид:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \gamma_{ap}}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (6)$$

При этом имеет место:  $r_{\min} = +\sqrt{(l^2 + t^2)}$ ; (7)

$$r_{\max} = +\sqrt{(L^2 + [t - (L - l) \operatorname{tg} \alpha]^2)} \quad (8)$$

Для случая 1, когда  $(L - l) \cdot \operatorname{tg} \alpha < t$ , имеем

$$\sin \delta = \frac{-e - \sqrt{e^2 - 4ac}}{2a} \quad (9)$$

где  $a = r^2(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)$

$$e = -2r(t + l \cdot \operatorname{tg} \alpha)$$

$$c = (t + l \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2 - r^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha$$

Для случая 2, когда  $2t > (L - l) \cdot \operatorname{tg} \alpha > t$ , радиус  $r$  может удовлетворять одному из 3-х значений:

$$1) r < \left( \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha} + l \right), \text{ т.е. приводится к случаю 1;}$$

$$2) r = \left( \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha} + l \right) \text{ откуда } \delta = 0;$$

$$3) r > \left( \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha} + l \right), \text{ т.е. } \delta \text{ отрицателен, а в этом случае } |\sin \delta| = \frac{-e - \sqrt{(e^2 - 4ac)}}{2a}.$$

Производящая кривая и поверхность, образуемая режущей кромкой.

В случае когда подача сверла имеет незначительную величину (менее 0,05мм.), в этом случае образуемая режущей кромкой сверла поверхность, является поверхность вращения на рис. 4 показаны координаты точек режущей кромки  $PQ$ .

Точки режущей кромки равны:

$$P(P_x, P_y, P_z) \text{ и } Q(Q_x, Q_y, Q_z)$$

$$P_x = l; P_y = t; P_z = 0$$

$$Q_x = L; Q_y = t - (L - l) \operatorname{tg} \alpha; Q_z = \frac{(L - l)}{\operatorname{tg} \alpha},$$

Уравнение главной режущей кромки  $PQ$  может быть записано в следующем виде

$$\frac{x - P_x}{Q - P_x} = \frac{y - P_y}{Q_y - P_y} = \frac{z - P_z}{Q_z - P_z} \quad (10)$$

Координаты любой точки  $C(C_x, C_y, C_z)$ , главной режущей кромки с радиусом  $r$  равны:

$$C_x = r \cdot \cos \delta; C_y = r \cdot \sin \delta; C_z = \frac{r \cdot \cos \delta - l}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (11)$$

Функция  $F(r, C_z)$  представляет собой производящую кривую для поверхности, образуемой режущей кромкой  $PQ$ . Из этого следует, что образуемая поверхность является однополостным гиперболоидом, а так же то, что ортогональный инструмент, имеющий форму производящей кривой в плоскости, проходящей через ось сверла, будет создавать такую же поверхность (рис. 5) [3,4].

Геометрия передней поверхности. Нормальный передний угол  $\gamma_N$  определяется как угол между нормалью к обработанной поверхности и касательной к кривой пересечения передней поверхности и плоскости, перпендикулярной к режущей кромке в рассматриваемой точке режущей кромки.

Запишем уравнение для  $PQ$  (уравнение 10)

$$\begin{aligned} l_1 &= Q_x - P_x, \\ m_1 &= Q_y - P_y, \\ n_1 &= Q_z - P_z \end{aligned} \quad (12)$$

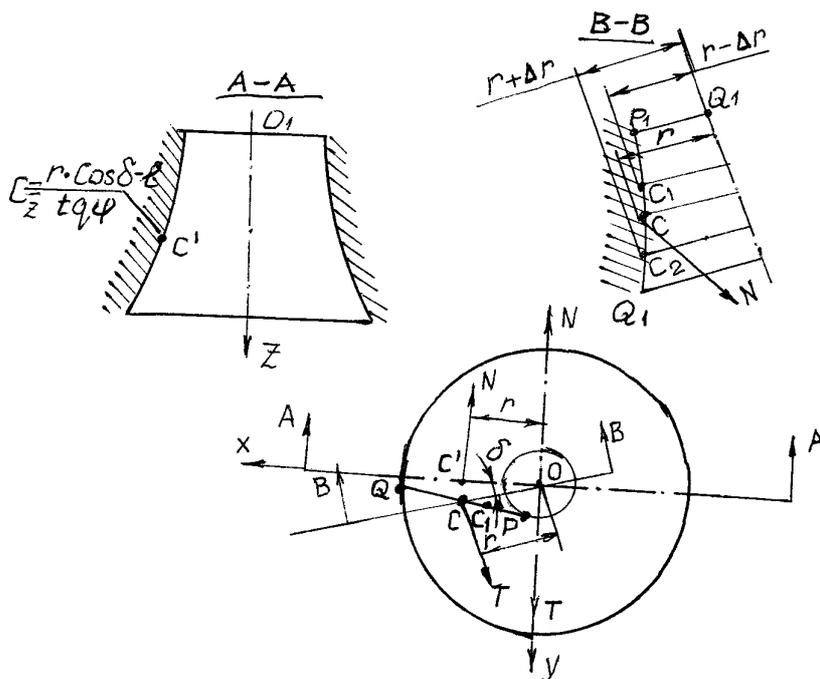


Рис. 5 Поверхность, образуемая при сверлении отверстия:  
 $PQ$  – режущая кромка;  $P_1Q_1$  – ортогональная режущая кромка, проходящая через точку  $C$ .

где  $(l, m, n)$  являются коэффициентами направления режущей кромки  $PQ$ . Принимаем, что  $CN$  является нормалью к поверхности в точке  $C$ , причем  $N(N_x, N_y, N_z)$  является точкой пересечения  $CN$  и оси образуемой поверхности (т.е. оси  $Z$ ). Тогда уравнение плоскости, перпендикулярной к  $PQ$  и проходящей через точку  $C$ , может быть записано в следующем виде

$$l_1(x - C_x) + m_1(y - C_y) + n_1(z - C_z) = 0 \quad (13)$$

Так как нормаль  $N$  лежит в плоскости (13), тогда координаты нормали запишутся в следующем виде:

$$N \left[ 0, 0, \frac{C_z + (l_1 C_x + m_1 C_y)}{n_1} \right] \quad (14)$$

На основании этого, уравнение для прямой  $CN$  запишется в следующей форме:

$$\frac{x - C_x}{N_x - C_x} = \frac{y - C_y}{N_y - C_y} = \frac{z - C_z}{N_z - C_z}, \quad (15)$$

где коэффициентами направления  $CN$  являются:

$$\begin{aligned} l_2 &= N_x - C_x, \\ m_2 &= N_y - C_y, \\ n_2 &= N_z - C_z \end{aligned} \quad (16)$$

Если учесть, что точки  $P, CuS$  лежат на передней поверхности:

$$P(P_x, P_y, P_z) \equiv (l, t, o)$$

$$C(C_x, C_y, C_z) \equiv \left( r \cos \delta, r \sin \delta, \frac{r \cdot \cos \delta - l}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \text{ и } S(S_x, S_y, S_z) \equiv (L, t, o)$$

в этом случае, уравнение плоскости передней поверхности можно записать в следующей форме:

$$\begin{vmatrix} x - P_x & y - P_y & z - P_z \\ P_x - C_x & P_y - C_y & P_z - C_z \\ C_x - S_x & C_y - S_y & C_z - S_z \end{vmatrix} = 0 \quad (17)$$

Приняв  $\lambda_1, \mu_1, \nu_1$  за коэффициенты направления нормали к плоскости передней поверхности, в этом случае их можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= (P_y - C_y) \cdot (C_z - S_z) - (P_z - C_z) \cdot (C_y - S_y), \\ \mu_1 &= (P_z - C_z) \cdot (C_x - S_x) - (P_x - C_x) \cdot (C_z - S_z), \\ \nu_1 &= (P_x - C_x) \cdot (C_y - S_y) - (P_y - C_y) \cdot (C_x - S_x). \end{aligned} \quad (18)$$

После преобразования уравнение (17) приводится к виду

$$\lambda_1(x - P_x) + \mu_1(y - P_y) + \nu_1(z - P_z) = 0 \quad (19)$$

Линия пересечения плоскостей, представленных уравнениями (13) и (19), ортогональна к нормальям к этим двум плоскостям и её коэффициенты направления могут быть записаны в такой форме:

$$\left. \begin{aligned} l_3 &= m_1 \nu_1 - n_1 \mu_1, \\ m_3 &= n_1 \lambda_1 - l_1 \nu_1, \\ n_3 &= l_1 \mu_1 - m_1 \lambda_1. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Когда режущая кромка  $PQ$  не является прямой линией, то выбирается элементарная режущая кромка  $C_1C_2$ , содержащая точку  $C$  и для нее определяются коэффициенты направления  $(l_4, m_4, n_4)$ .

Из определения нормального переднего угла  $\gamma_N$  следует, что это угол между прямыми линиями (16) и (20), поэтому он может быть определен уравнением следующего вида:

$$\cos \gamma_N = \pm \frac{l_2 \cdot l_3 + m_2 \cdot m_3 + n_2 \cdot n_3}{\sqrt{\left[ (l_2^2 + m_2^2 + n_2^2) \cdot (l_3^2 + m_3^2 + n_3^2) \right]}} \quad (21)$$

Передний угол в плоскости вектора скорости -  $\gamma_n$  измеряется в плоскости, проходящей через вектор скорости и нормаль к поверхности резания.

Вектор скорости СТ в любой точке С пересекает плоскость  $Y-Z$  в точке  $T(T_x, T_y, T_z)$ , как показано на рис.5,

$$\text{где } T_x = 0, T_y = \frac{r}{\sin \delta} \text{ и } T_z = C_z \quad (22)$$

Принимаем  $(l_5, m_5, n_5)$  за коэффициенты направления СТ соответственно равные:

$$\begin{aligned} l_5 &= T_x - C_x, \\ m_5 &= T_y - C_y, \\ n_5 &= T_z - C_z \end{aligned} \quad (23)$$

Плоскость вектора скорости, в которой лежит передний угол  $\gamma_V$ , содержит в себе прямые  $CN$  и  $CT$ , а поэтому её уравнение может быть записано в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} x - C_x & y - C_y & z - C_z \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_5 & m_5 & n_5 \end{vmatrix} \quad (24)$$

После преобразований имеем:

$$\lambda_2(x - C_x) + \mu_2(y - C_y) + \gamma_2(z - C_z) = 0 \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= m_2 \cdot n_5 - n_2 \cdot m_5, \\ \mu_2 &= n_2 \cdot l_5 - l_2 \cdot n_5, \\ \gamma_2 &= l_2 \cdot m_5 - m_2 \cdot l_5. \end{aligned} \quad (26)$$

Отсюда следует, что коэффициенты направления линии пересечения плоскости вектора скорости и плоскости передней поверхности, обозначенные  $(l_6, m_6, n_6)$ , соответственно равны:

$$\begin{aligned} l_6 &= \mu_1 \cdot \gamma_2 - \mu_2 \cdot \gamma_1 \\ m_6 &= \gamma_1 \cdot \lambda_2 - \gamma_2 \cdot \lambda_1 \\ n_6 &= \lambda_1 \cdot \mu_2 - \lambda_2 \cdot \mu_1 \end{aligned} \quad (27)$$

Из определения переднего угла в плоскости вектора скорости следует, что этот угол между прямыми линиями, коэффициентами направления которых являются  $(l_2, m_2, n_2)$  и  $(l_6, m_6, n_6)$ , может быть определён по следующей зависимости:

$$\cos \gamma_V = \pm \frac{l_2 \cdot l_6 + m_2 \cdot m_6 + n_2 \cdot n_6}{\sqrt{\left[ (l_2^2 + m_2^2 + n_2^2) \cdot (l_6^2 + m_6^2 + n_6^2) \right]}} \quad (28)$$

В этом случае выбор знака зависит от направления измерения.

Угол наклона  $\lambda$  В любой точке режущей кромки может быть определён как угол между касательными к криволинейной режущей кромке и к воображаемой

ортогональной режущей кромке в рассматриваемой точке, причем эта последняя должна быть той, которая произвела бы точно такую же поверхность. Из рис. 5 видно, что для каждой точки режущей кромки производящая кривая, проходящая через нее, представляет собой ортогональную режущую кромку в данной точке.

Для рассматриваемого инструмента режущая кромка  $PQ$  будучи прямой линией, представляет собой как бы касательную к режущей кромке. На рис. 5, кривая  $P_1CQ_1$  является производящей кривой, проходящей через точку на режущей кромке  $C$ . Пусть  $C_1$  и  $C_2$  две точки расположенные достаточно близко от  $C$  на производящей кривой, проходящей через  $C$ . Пусть  $(r - \Delta r)$  и  $(r + \Delta r)$  представляют собой радиус для  $C_1$  и  $C_2$  соответственно, где  $\Delta r$  бесконечно мало. Тогда координаты точек  $C_1$  и  $C_2$  выразятся через следующие равенства:

$$\begin{aligned} C_{1x} &= (r - \Delta r) \cdot \cos \delta, & C_{2x} &= (r - \Delta r) \cdot \cos \delta, \\ C_{1y} &= (r - \Delta r) \cdot \sin \delta, & C_{2y} &= (r - \Delta r) \cdot \sin \delta, \\ C_{1z} &= \frac{(r - \Delta r) \cos \delta - l}{\operatorname{tg} \varphi}, & C_{2z} &= \frac{(r - \Delta r) \cos \delta - l}{\operatorname{tg} \varphi}. \end{aligned}$$

Для малых значений  $\Delta r$   $C_1C_2$  представляет собой касательную к производящей кривой, проходящей через  $C$ . Отсюда следует, что коэффициенты направления  $C_1C_2$  и обозначенные  $(l_7, m_7, n_7)$ , определяются равенствами:

$$\left. \begin{aligned} l_7 &= C_{2x} - C_{1x}, \\ m_7 &= C_{2y} - C_{1y}, \\ n_7 &= C_{2z} - C_{1z}. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Угол наклона  $\lambda$  есть угол между режущей кромкой  $PQ$  и касательной  $C_1C_2$  к ортогональной режущей кромке, проходящей через  $C$ , и определяется уравнением:

$$\cos \lambda = \pm \frac{l_1 \cdot l_7 + m_1 \cdot m_7 + n_1 \cdot n_7}{\sqrt{\left[ (l_1^2 + m_1^2 + n_1^2) \cdot (l_7^2 + m_7^2 + n_7^2) \right]}} \quad (30)$$

Передний угол в плоскости параллельной оси -  $\gamma_P$ , есть угол, измеренный в плоскости параллельной оси сверла и перпендикулярной к плоскости, образованной режущей кромкой и прямой, параллельной оси и проходящей через рассматриваемую точку режущей кромки. Рассмотрим точку  $U$  в плоскости  $(X, Y)$  со следующими координатами:

$$U_x = Q_x, U_y = Q_y, U_z = 0$$

Коэффициенты направления линии  $PU$  определяются равенствами:

$$\begin{aligned} l_9 &= U_x - P_x, \\ m_9 &= U_y - P_y, \\ n_9 &= U_z - P_z. \end{aligned} \quad (31)$$

Уравнение плоскости  $PQU$  запишем в следующем виде:

$$\lambda_3(x - P_x) + \mu_3(y - P_y) + \gamma_3(z - P_z) = 0 \quad (32)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \lambda_3 &= (P_y - Q_y) \cdot (Q_z - U_z) - (P_z - Q_z) \cdot (Q_y - U_y) \\ \mu_3 &= (P_z - Q_z) \cdot (Q_x - U_x) - (P_x - Q_x) \cdot (Q_z - U_z) \\ \gamma_3 &= (P_x - Q_x) \cdot (Q_y - U_y) - (P_y - Q_y) \cdot (Q_x - U_x) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Уравнение плоскости (в которой измеряется угол  $\gamma_P$ ), перпендикулярной к прямой линии  $PU$  и содержащей точку  $C$ , имеет вид:

$$l_9(x - C_x) + m_9(y - C_y) + n_9(z - C_z) = 0 \quad (34)$$

Точкой пересечения плоскости измерения угла  $\gamma_P$ , описанной уравнением (34) и прямой  $PU$  является  $C'(C'_x, C'_y, C'_z)$ , где

$$\left. \begin{aligned} C'_x &= P_x + l_9 \cdot t_1, \\ C'_y &= P_y + m_9 \cdot t_1, \\ C'_z &= P_z + n_9 \cdot t_1, \\ t_1 &= \frac{[(l_9 \cdot P_x + m_9 \cdot P_y + n_9 \cdot P_z) - (l_9 \cdot C_x + m_9 \cdot C_y + n_9 \cdot C_z)]}{(l_9^2 + m_9^2 + n_9^2)} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Коэффициенты направления прямой  $C'C$  определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} l_{10} &= C_x - C'_x, \\ m_{10} &= C_y - C'_y, \\ n_{10} &= C_z - C'_z. \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Коэффициенты направления линии пересечения плоскости измерения угла  $\gamma_P$  и плоскости передней поверхности, описываемых соответственно уравнениями (34) и (19) обозначаются  $l_{11}, m_{11}, n_{11}$  и определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} l_{11} &= m_9 \cdot \gamma_1 - n_9 \cdot \mu_1, \\ m_{11} &= n_9 \cdot \lambda_1 - l_9 \cdot \gamma_1, \\ n_{11} &= l_9 \cdot \mu_1 - m_9 \cdot \lambda_1. \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Исходя из этого, передний угол в плоскости параллельной оси  $\gamma_p$ , определяется зависимостью:

$$\cos \gamma_p = \frac{\pm(l_{10} \cdot l_{11} + m_{10} \cdot m_{11} \cdot n_{10} \cdot n_{11})}{\sqrt{\left[ \left( l_{10}^2 + m_{10}^2 + n_{10}^2 \right) \cdot \left( l_{11}^2 + m_{11}^2 + n_{11}^2 \right) \right]}} \quad (38)$$

#### Направление схода стружки и эффективный угол $\gamma_e$ .

Направление схода стружки на передней поверхности режущего инструмента обычно определяется углом –  $\eta$  между направлением схода стружки и нормалью к режущей кромке на передней поверхности (рис.1)

Эффективный передний угол -  $\gamma_e$  есть угол между направлением схода стружки и перпендикуляром к вектору скорости резания в плоскости, которая проходит через вектор скорости резания. Иначе говоря, он дополнение до прямого угла между вектором скорости резания и вектором скорости стружки.

Для такого инструмента, как сверло, вследствие изменения углов  $\gamma_N$ ,  $\gamma_V$  и  $\lambda$  вдоль главных режущих кромок, угол схода стружки также изменяется вдоль этих кромок. Пусть  $(l_{12}, m_{12}, n_{12})$  представляют собой коэффициенты направления вектора схода стружки в произвольной точки С на главной режущей кромке. Поскольку нам известны коэффициенты направления  $(l_5, m_5, n_5)$  вектора скорости резания у точки С, описанные уравнением (23), то эффективный передний угол  $\gamma_e$  может быть определен зависимостью:

$$\gamma_e = \arccos \left[ \pm \frac{l_5 \cdot l_{12} + m_5 \cdot m_{12} + n_5 \cdot n_{12}}{\sqrt{\left[ \left( l_5^2 + m_5^2 + n_5^2 \right) \cdot \left( l_{12}^2 + m_{12}^2 + n_{12}^2 \right) \right]}} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (39)$$

Другим приближенным методом определения угла  $\gamma_e$  является условие когда мы принимали угол  $\eta$  и угол  $\lambda$  приблизительно равны и тогда путем подстановки  $\lambda$  и  $\gamma_N$  в уравнение (5) получаем зависимость:

$$\sin \gamma_e = \sin^2 \lambda + \cos^2 \lambda \cdot \sin \gamma_N$$

Зависимость между углами  $\gamma_N$ ,  $\gamma_V$  и  $\lambda$  удовлетворяется следующим выражением:

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \operatorname{tg} \gamma_V \cdot \cos \lambda \quad (40)$$

#### Геометрия задней поверхности.

Предполагая существование единственной касательной плоскости вдоль главной режущей кромки, можно определить уравнение этой касательной плоскости (задней грани), если известна точка на режущей кромке  $PQ$ .

Пусть  $\alpha_{ap}$ , задний угол, соответствующий переднему углу –  $\gamma_{ap}$ , На рис.4 координаты точки  $Q_1$  на касательной плоскости, соответствующей точке  $Q$ , соответствуют:

$$\begin{aligned} Q_{1x} &= Q_x; \\ Q_{1y} &= -t; \\ Q_{1z} &= Q_z + (t + Q_y) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap}. \end{aligned}$$

Отсюда уравнение задней грани  $PQQ_1$  можно записать в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} x - P_x & y - P_y & z - P_z \\ P_x - Q_x & P_y - Q_y & P_z - Q_z \\ Q_x - Q_{1x} & Q_y - Q_{1y} & Q_z - Q_{1z} \end{vmatrix} = 0 \quad (41)$$

Если  $(\lambda_4, \mu_4, \nu_4)$  коэффициенты направления нормали к плоскости  $PQQ_1$ , то

$$\begin{aligned} \lambda_4 &= (P_y - Q_y) \cdot (Q_z - Q_{1z}) - (P_z - Q_z) \cdot (Q_y - Q_{1y}); \\ \mu_4 &= (P_z - Q_z) \cdot (Q_x - Q_{1x}) - (P_x - Q_x) \cdot (Q_z - Q_{1z}); \\ \nu_4 &= (P_x - Q_x) \cdot (Q_y - Q_{1y}) - (P_y - Q_y) \cdot (Q_x - Q_{1x}). \end{aligned} \quad (42)$$

Нормальный задний угол  $\alpha_N$ . Коэффициенты направления нормалей к плоскости измерения нормального переднего угла и задней плоскости суть соответственно  $(l_1, m_1, n_1)$  и  $(\lambda_4, \mu_4, \nu_4)$ ; если принять, что коэффициентами направления линии, ортогональной к этим двум нормальям, являются  $(l_{13}, m_{13}, n_{13})$ , то имеют место равенства:

$$\left. \begin{aligned} l_{13} &= m_1 \nu_4 - n_1 \mu_4 \\ m_{13} &= n_1 \lambda_4 - l_1 \nu_4 \\ n_{13} &= l_1 \mu_4 - m_1 \lambda_4 \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Поскольку  $(l_2, m_2, n_2)$  суть коэффициенты направления нормали к поверхности резания в точке  $C$  (см. рис.5), то нормальный задний угол  $\alpha_N$  можно определить при помощи уравнения:

$$\alpha_N = \frac{\pi}{2} - \arccos \left[ \pm \frac{l_2 \cdot l_{13} + m_2 \cdot m_{13} + n_2 \cdot n_{13}}{\sqrt{\left[ (l_2^2 + m_2^2 + n_2^2) \cdot (l_{13}^2 + m_{13}^2 + n_{13}^2) \right]}} \right] \quad (44)$$

Задний угол в плоскости вектора скорости резания  $\alpha_v$ .

Коэффициенты направления нормами к плоскости вектора скорости резания суть  $(\lambda_2, \mu_2, \nu_2)$ . Обозначим коэффициенты направления линии, ортогональной к двум нормальям с коэффициентами направления соответственно  $(\lambda_2, \mu_2, \nu_2)$  и  $(\lambda_4, \mu_4, \nu_4)$ , через  $(l_{14}, m_{14}, n_{14})$ , тогда

$$\left. \begin{aligned} l_{14} &= \mu_2 \cdot \nu_4 - \nu_2 \cdot \mu_4, \\ m_{14} &= \nu_2 \cdot \lambda_4 - \lambda_2 \cdot \nu_4, \\ n_{14} &= \lambda_2 \cdot \mu_4 - \mu_2 \cdot \lambda_4 \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Задний угол в плоскости вектора скорости резания  $\alpha_V$  измеряется в плоскости, содержащей вектор скорости резания и нормаль к поверхности резания, и определяется уравнением:

$$\alpha_V = \frac{\pi}{2} - \arccos \left[ \pm \frac{l_2 \cdot l_{14} + m_2 \cdot m_{14} + n_2 \cdot n_{14}}{\sqrt{\left[ (l_2^2 + m_2^2 + n_2^2) \cdot (l_{14}^2 + m_{14}^2 + n_{14}^2) \right]}} \right] \quad (46)$$

Задний угол в плоскости параллельной оси  $\alpha_p$ :

Коэффициент направления нормали к плоскости измерения переднего угла  $\alpha_p$  суть  $(l_9, m_9, n_9)$ . Обозначим коэффициенты направления линии, ортогональной к двум нормальям с коэффициентами направления соответственно  $(l_9, m_9, n_9)$  и  $(\lambda_4, \mu_4, \nu_4)$  через  $(l_{15}, m_{15}, n_{15})$ , тогда

$$\left. \begin{aligned} l_{15} &= m_9 \cdot \nu_4 - n_9 \cdot \mu_4, \\ m_{15} &= n_9 \cdot \lambda_4 - l_9 \cdot \nu_4, \\ n_{15} &= l_9 \cdot \mu_4 - m_9 \cdot \lambda_4. \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Отсюда следует, что задний угол  $\alpha_p$ , измеренный в той же плоскости, что и передний угол  $\gamma_p$  определяется уравнением:

$$\alpha_p = \frac{\pi}{2} - \arccos \left[ \pm \frac{l_{10} \cdot l_{15} + m_{10} \cdot m_{15} + n_{10} \cdot n_{15}}{\sqrt{\left[ (l_{10}^2 + m_{10}^2 + n_{10}^2) \cdot (l_{15}^2 + m_{15}^2 + n_{15}^2) \right]}} \right] \quad (48)$$

где  $(l_{10}, m_{10}, n_{10})$  – суть коэффициенты направления линии, параллельной оси  $Z$  в точке  $C$  (см. рис. 5).

Зависимость между углами,  $\alpha_N, \alpha_V$  и  $\lambda$ . Для инструмента с наклонной режущей кромкой нормальный задний угол, задний угол в плоскости вектора скорости резания и угол наклона режущей кромки находится в следующей зависимости

$$\operatorname{tg} \alpha_V = \operatorname{tg} \alpha_N \cdot \cos \lambda \quad (49)$$

Измерение геометрических параметров сверла и сравнение результатов расчетов производилось на универсальном инструментальном микроскопе УИМ-23ЛОМО. Сверло помещалось в горизонтальную V-образную призму, устанавливалось на плиту, которая вращалась вокруг вертикальной оси относительно другой базовой плиты. Сверло также вращалось вокруг собственной оси приводом червячной пары. Таким образом, передние и задние углы изменились по соответствующим поверхностям и соответствующим секущим поверхностям. На рис. 6 и 7 приведено сравнение теоретических расчетных значений и значений углов полученных измерениями. Анализ этих графиков позволяет сделать следующие выводы.

### Выводы

1. Передние  $\gamma_p$  и задние  $\alpha_p$  углы и кинематические условные углы  $\gamma_{ap}$  и  $\alpha_{ap}$  остаются практически неизменными вдоль режущей кромки сверла.

2. Нормальный передний угол  $\gamma_N$  и передний угол в плоскости вектора скорости  $\gamma_V$  для малых диаметров сверл (в пределах от 2-х до 5 мм.) имеют отрицательное значение (от  $-30^\circ$  до  $-10^\circ$ ), с увеличением диаметра сверла (более 5 мм.) эти углы увеличиваются и приобретают положительное значение (до  $+5^\circ$ ).

3. Нормальный задний угол  $\alpha_N$  и задний угол в плоскости вектора скорости  $\alpha_V$ , для малых значений (ближе к оси сверла) имеют большие значение задних углов до  $+40^\circ \div 30^\circ$  с увеличением диаметра сверла (ближе к периферии) абсолютное значение этих углов резко (после  $\varnothing 10$  мм) снижаются и практически достигают значений  $\alpha_p$  ( $\alpha_{ap}$ ).

4. Этот метод может быть распространен на исследование изменений геометрических параметров вдоль режущих кромок метчиков и разверток.

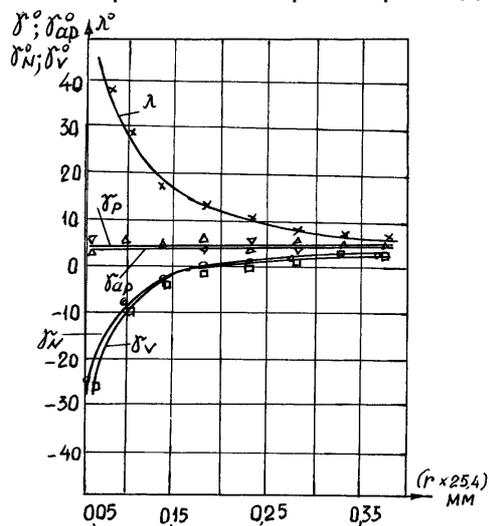


Рис. 6 Передние углы  $\gamma_p; \gamma_{ap}; \gamma_N; \gamma_V$  и углы наклона  $\lambda$  вдоль режущей кромки перового сверла, (исходные данные для сверла -

$$2\varphi = 130^\circ; \gamma_{ap} = 7^\circ; \alpha_{ap} = 7^\circ).$$

Обозначения:  $x - \lambda; \Delta - \gamma_V; \square - \gamma_V;$

$\bullet - \gamma_N; \circ - \gamma_{ap};$

сплошная линия – расчетные значения

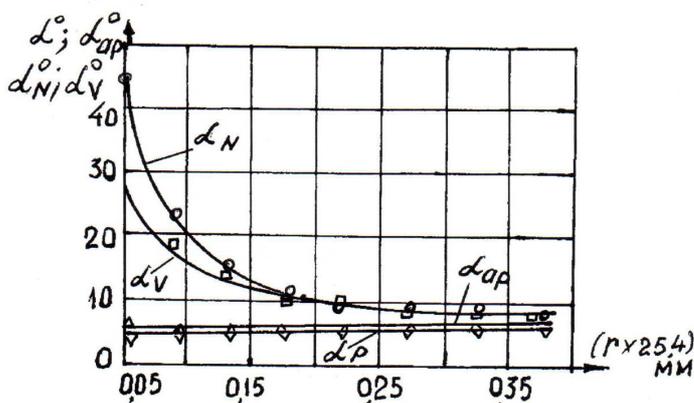


Рис. 7 Задние углы  $\alpha_p; \alpha_{ap}; \alpha_N; \alpha_V$  перового сверла вдоль режущей кромки (исходные данные  $\gamma_{ap} = 5^\circ; 2\varphi = 130^\circ; \alpha_{ap} = 7^\circ$ ).

Обозначения:  $\circ - \alpha_N; \square - \alpha_V;$

$\Delta - \alpha_{ap}; \nabla - \alpha_p;$

сплошная линия – расчетные значения

Проведенные экспериментальные и производственные испытания позволили получить при обработке отверстий на стеклопластиках и углеродистых пластиках, повышение стойкости до 2-х раз по сравнению с рекомендуемыми в технической литературе сверлами с оптимальной заточкой.

### Список литературы

1. Развитие науки о резании металлов / Под ред. Н.Н. Зорева. – М. Машиностроение. 1967. – 415 с.
2. Composite manufacturing technology. Edited by A.G. Bratukhin and V.S. Bogolybov. SHAPMAN & HALL, London. 1995. – 433 p.
3. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П.Р. Родин – К.: Вища шк. 1997. – 192 с.
4. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский – М.: Машиностроение. 1966. – 870 с.

**Рецензент:** д.т. н., проф., В.С. Антонюк, КПИ, Киев

Поступила в редакцию 01.06.10

## Теоретичне визначення кінематичних кутів перових свердел

Розв'язано задачу визначення передніх і задніх кутів перових свердел для невіЛЬНОГО косокутового різання.

**Ключові слова:** перові свердла, кінематичні кути, формотвірні поверхні, криволінійні крайки, передні та задні кути.

## Theoretical determination of working angles of common bits.

The issues about shaping of working geometrical parameters of common bits is considered, an analytical solution of the task of determination of front and rear angles of common bits in the process of cutting has been demonstrated.

**Keywords:** common bits, working angles, shaping surfaces, curvilinear lips, front and rear angles.