РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ НЕСВОБОДНОГО КОСОУГОЛЬНОГО РЕЗАНИЯ

Несвободное резание отличается от свободного тем, что сечение срезаемого слоя формируют две или больше режущие кромки. На рисунке 2.1 показана главная режущая кромка AC и вспомогательная режущая кромка CB, которые пересекаются в точке C – вершине лезвия токарного проходного резца. Рассматриваем прямоугольное резание, т.е. угол наклона кромок равен нулю и эти кромки лежат в плоскости чертежа – в основной плоскости. Тогда можно допустить, что векторы скорости схода стружки пропорциональны длинам и перпендикулярны к соответствующим кромкам, а суммарный вектор определен по правилу суммирования векторов $\mathbf{ACB} = \mathbf{AC} + \mathbf{BC}$. Длины кромок будут равны: $AC = t / \sin\varphi$; $BC = \dfrac{s \cdot \sin\varphi}{\sin(\varphi + \varphi_1)}$.

Углом схода стружки назовем угол между суммарным вектором схода и перпендикуляром к главной режущей кромке. На рисунке 2.1 угол схода обозначен как Δ и является углом между векторами $\mathbf{ACB}, \mathbf{AC}$. Можно показать, что отношение длин векторов равно: $\dfrac{AC}{BC} = \dfrac{\sin(\varphi + \varphi_1 - \Delta)}{\sin\Delta}$. Из приведенных соотношений после преобразований следует выражение для расчета угла схода стружки:

$$\Delta = -\operatorname{arctg}\left[\frac{s \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)\sin^2\varphi}{t \cdot \sin(\varphi + \varphi_1) + s \cdot \sin^2\varphi\cos(\varphi + \varphi_1)}\right]$$

Угол схода показывает отклонение стружки от перпендикуляра к прямолинейной части главной режущей кромки. Будем считать угол схода положительным, если стружка отклоняется вправо от перпендикуляра (к вершине инструмента), и отрицательным, если стружка отклоняется влево. Тогда обозначенный на рисунке 2.2 угол Δ будет отрицательным.

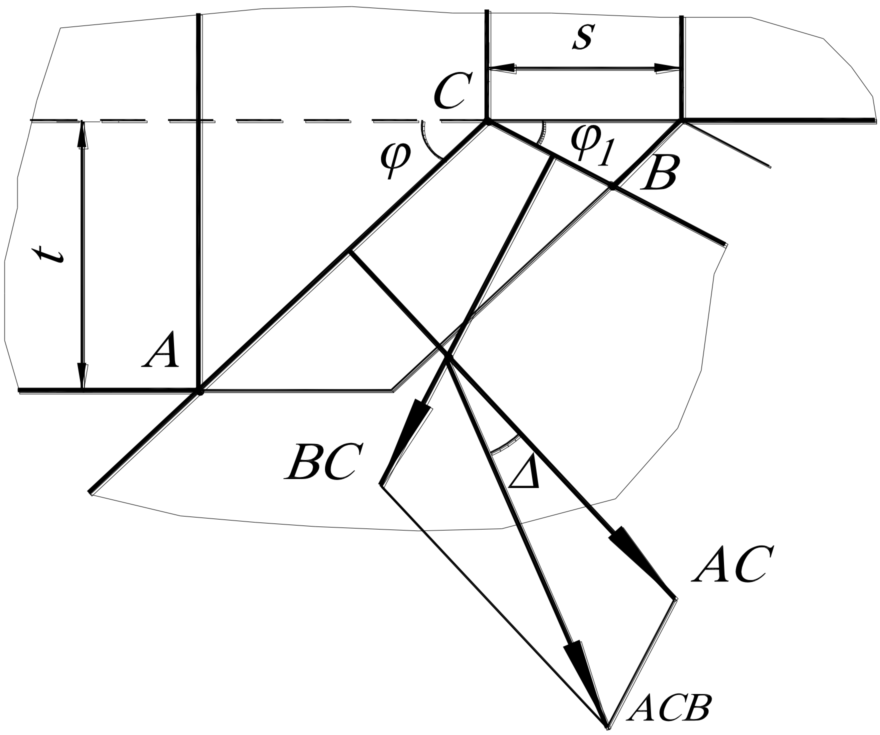

Рис. 2.1

Угол схода стружки для резца с острой вершиной при несвободном резании

Косоугольное резание выполняется, когда главная режущая кромка наклонена к основной плоскости под углом λ. При косоугольном резании стружка при ее движении по передней поверхности дополнительно будет отклоняться от перпендикуляра к главной режущей кромке на величину угла наклона. Тогда угол схода стружки для несвободного косоугольного резания будет равен

$$\Delta_c = \Delta + \lambda .$$

Средний угол в плане

$$\varphi_c = \varphi + \Delta_c$$

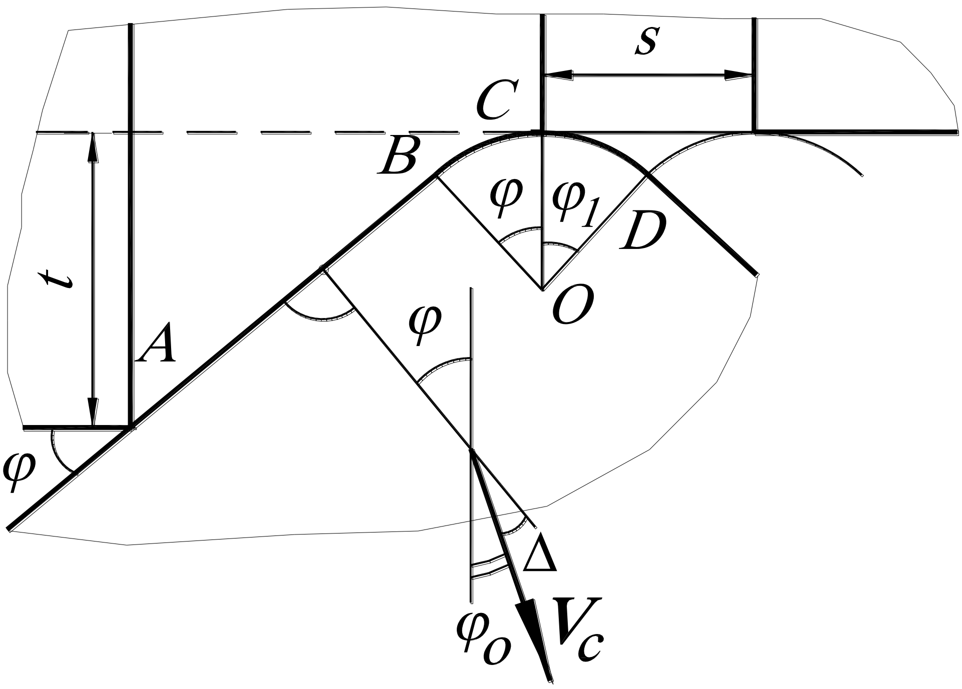

Рис. 2.2

Угол схода стружки для резца с закругленной вершиной

Для наиболее распространенного случая продольного точения резец имеет закругленную вершину. Тогда главная режущая кромка, формирующая большую сторону сечения среза, имеет две части – прямолинейную *AB* и дугу окружности радиуса *r* – *BC*. Вспомогательная режущая кромка есть дуга окружности *CD* как показано на рисунке 2.2. Угол в плане будет переменным и изменяться вдоль кромки от значения φ на прямолинейной части до нуля в точке *C*, и до значения φ_1 в точке *D*. Среднее значение угла в плане можно определить из соотношения (С.Н. Филоненко):

$$\varphi_0 = \frac{\int\limits_{AB} \varphi dL + \int\limits_{BC} \varphi dL + \int\limits_{CD} \varphi dL}{L_{ABCD}} = \frac{\varphi \frac{t - r\left(1-\cos\varphi\right)}{\sin\varphi} + \frac{r\varphi^2}{2} + \frac{r\varphi_1^2}{2}}{\frac{t - r\left(1-\cos\varphi\right)}{\sin\varphi} + r\varphi + r\varphi_1}.$$

Угол схода показывает отклонение стружки от перпендикуляра к прямолинейной части главной режущей кромки. Будем считать угол схода положительным, если стружка отклоняется вправо от перпендикуляра (к вершине инструмента), и отрицательным, если стружка отклоняется влево. Тогда обозначенный на рисунке 2.2 угол Δ будет отрицательным и справедливо выражение для его расчета: $\Delta = \varphi_0 - \varphi$.

Если глубина резания мала и выполняется соотношение $t < r\left(1-\cos\varphi\right)$, то прямолинейная часть на главной кромке отсутствует и углы в плане рассчитаем для крайних точек кромки: $\varphi = \arccos\left(\frac{r-t}{r}\right)$; $\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{s}{2r}\right)$, и выражение (2.2) преобразуется к виду:

$$\varphi_0 = \frac{\varphi^2 + \varphi_1^2}{2\left(\varphi + \varphi_1\right)}$$

Угол схода стружки будет равен

$$\Delta_c = \varphi_0 - \varphi + \lambda .$$

Средний угол в плане

$$\varphi_c = \varphi + \Delta_c$$

Через средний угол в плане можно перейти от схемы несвободного косоугольного резания к схеме свободного прямоугольного резания с расчетными параметрами:

– средняя толщина среза $a_c = s \cdot \sin \varphi_c$,

– ширина среза $b_c = t / \sin \varphi_c$,

– длина кромки
$$b_{kr} = \frac{t - r\left(1 - \cos\varphi\right)}{\sin\varphi \cdot \cos\lambda} + r\varphi, \quad t \geq r\left(1 - \cos\varphi\right);$$
$$b_{kr} = r \cdot \arccos\left(\frac{r - t}{r}\right), \quad t < r\left(1 - \cos\varphi\right)$$

– передний угол в направлении схода стружки γ_c

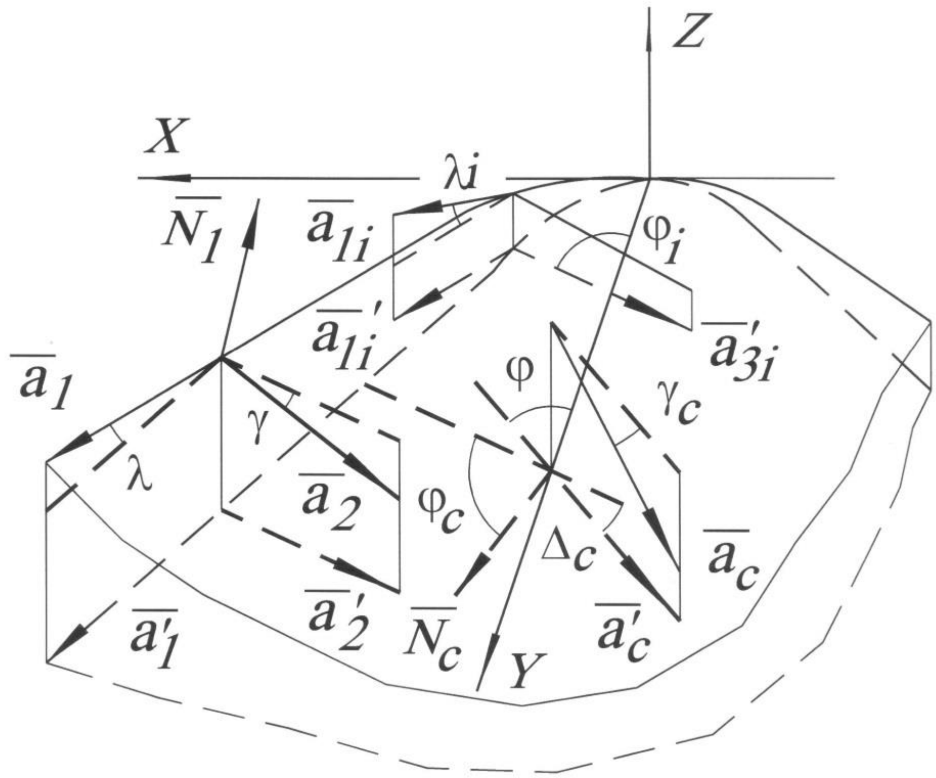

Рис. 2.3. Схема для расчета переднего угла в направлении схода стружки

Расчет переднего угла в направлении схода стружки проведен в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.3. Показана система координат XYZ, сориентированная в направлении подачи (ось X), в радиальном направлении (ось Y), в тангенциальном направлении по вектору скорости резания (ось Z). Введена вспомогательная система координат $X'Y'$, расположенная в основной плоскости так, что угол между осями X, X' является главным углом в плане φ. Связь систем координат задана системой уравнений:

$$x = x'\cos\varphi - y'\sin\varphi; \quad y = x'\sin\varphi + y'\cos\varphi; \quad z = z'. \qquad (0.1)$$

Единичные векторы задают положение: $\bar{a}_1$ – главной режущей кромки; $\bar{a}_2$ – следа передней плоскости в главной секущей плоскости. Уравнения векторов записаны в системе координат $X'Y'Z'$:

$$\bar{a}_1 = \cos\lambda\, \bar{i}' + \sin\lambda\, \bar{k}'; \quad \bar{a}_2 = \cos\gamma\, \bar{j}' - \sin\gamma\, \bar{k}'. \qquad (0.2)$$

Эти векторы можно переписать в системе координат XYZ в соответствии с системой (0.1), а нормаль к передней плоскости запишется через векторное произведение этих векторов:

$$\bar{N}_1 = \bar{a}_1 \times \bar{a}_2 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \cos\lambda\cos\varphi & \cos\lambda\sin\varphi & \sin\lambda \\ -\cos\gamma\sin\varphi & \cos\gamma\cos\varphi & -\sin\gamma \end{vmatrix} = N_{11}\,\bar{i} + N_{12}\,\bar{j} + N_{13}\,\bar{k}. \qquad (0.3)$$

где проекции по осям равны:

$$N_{11} = -\cos\lambda\sin\varphi\sin\gamma - \sin\lambda\cos\varphi\cos\gamma;$$
$$N_{12} = \cos\lambda\cos\varphi\sin\gamma - \sin\lambda\sin\varphi\cos\gamma;$$
$$N_{13} = \cos\lambda(\cos\varphi)^2\cos\gamma + \cos\lambda(\sin\varphi)^2\cos\gamma = \cos\lambda\cos\gamma.$$

Вектор, задающий направление схода стружки по основной плоскости равен:

$$\bar{a}'_c = -\sin(\varphi + \Delta_c)\,\bar{i} + \cos(\varphi + \Delta_c)\,\bar{j}\,. \tag{0.4}$$

Тогда нормаль к плоскости схода стружки также лежит в основной плоскости и перпендикулярна вектору (0.4):

$$\bar{N}_c = \cos(\varphi + \Delta_c)\,\bar{i} + \sin(\varphi + \Delta_c)\,\bar{j}\,. \tag{0.5}$$

Вектор схода стружки лежит в передней плоскости и определяется через векторное произведение нормалей как линия пересечения плоскостей передней и схода стружки:

$$\bar{a}_c = \bar{N}_1 \times \bar{N}_c = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ \cos(\varphi + \Delta_c) & \sin(\varphi + \Delta_c) & 0 \end{vmatrix} = a_{c1}\bar{i} + a_{c2}\bar{j} + a_{c3}\bar{k}\,, \tag{0.6}$$

где проекции по осям равны:

$$\begin{aligned} a_{c1} &= -N_{13}\sin(\varphi + \Delta_c); \\ a_{c2} &= N_{13}\cos(\varphi + \Delta_c); \\ a_{c3} &= N_{11}\sin(\varphi + \Delta_c) - N_{12}\cos(\varphi + \Delta_c). \end{aligned}$$

Передний угол в направлении схода стружки можно рассчитать через алгебраическое произведение векторов (0.4) и (0.6):

$$\gamma_c = e \cdot \arccos\left[\frac{-\sin(\varphi + \Delta_c)\,a_{c1} + \cos(\varphi + \Delta_c)\,a_{c2}}{\sqrt{a_{c1}^2 + a_{c2}^2 + a_{c3}^2}}\right], \tag{0.7}$$

где первый сомножитель определяет знак угла, $e = 1$, если $a_{c3} < 0$ и $e = -1$, если $a_{c3} > 0$.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

В механике несвободного косоугольного резания экспериментально и теоретически обосновано положение о том, что векторы скорости схода стружки, скорости резания и скорости сдвига лежат в одной плоскости (Н.Н. Зорев, В.Ф. Бобров). Тогда с приемлемым упрощением для инженерных расчетов можно считать, что равнодействующая силы резания со стороны передней поверхности действует в направлении схода стружки.

Расчет составляющих силы резания можно выполнить по соответствующим формулам для свободного прямоугольного резания (по ДЗ1). При расчете вместо переднего угла, толщины и ширины срезаемого слоя необходимо использовать передний угол в направлении схода стружки γ_c (0.7), среднюю толщину a_c через средний угол в плане φ_c и длину режущей кромки b_{kr}. Таким образом, составляющие силы резания на передней поверхности являются функциями ранее рассмотренных параметров:

$$P_{yp}, P_{zp} = f\left(\gamma_c, a_c, b_{kr}\right) .$$

Длины прямолинейного участка кромки AB и радиусного участка BC по схеме рисунка 2.2 составляют:

– если глубина резания $t \geq t'$, $t' = r\left(1 - \cos\varphi\right)$

$$AB = \frac{t - t'}{\sin\varphi\cos\lambda} \; ; \; BC = r\varphi \; ;$$

– если глубина резания $t < t'$

$$AB = 0; \quad BC = r \cdot \arccos\left(\frac{r - t}{r}\right) .$$

В результате износа действуют нормальные силы на задней поверхности инструмента, обозначенные как N_2:

$$N_{2AB} = \sigma_m l_2 \cdot AB / 2; \quad N_{2BC} = \sigma_m l_2 \cdot BC / 2 ,$$

где l_2 – длина контакта по задней поверхности резца.

Все рассмотренные силы можно спроецировать на оси системы координат XYZ и, суммируя, определить результирующие составляющие силы резания:

– если глубина резания $t \geq t'$, $t' = r\left(1 - \cos\varphi\right)$

$$P_x = -P_{yp}\sin\varphi_c - N_{2AB}\sin\varphi - N_{2BC}\sin(\varphi/2);$$
$$P_y = P_{yp}\cos\varphi_c + N_{2AB}\cos\varphi + N_{2BC}\cos(\varphi/2);$$
$$P_z = P_{zp} + f_{tr}\left(N_{2AB} + N_{2BC}\right);$$

– если глубина резания $t < t'$

$$P_x = -P_{yp}\sin\varphi_c - N_{2BC}\sin(\varphi_{00}/2);$$
$$P_y = P_{yp}\cos\varphi_c + N_{2BC}\cos(\varphi_{00}/2);$$
$$P_z = P_{zp} + f_{tr}\left(N_{2BC}\right);$$
$$\varphi_{00} = \arccos\left(\frac{r-t}{r}\right).$$

Литература

1. Грубый С.В. Расчет параметров и показателей процесса резания: учебное пособие – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 192 с.