

А.С. Мановицкий, к.т.н., с.н.с.

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля  
НАН Украины***РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ И СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ  
РЕЗАНИЯ ПРИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОМ ТОЧЕНИИ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ЧУГУНОВ И СТАЛЕЙ**

*Точение деталей сложного профиля из износостойких материалов имеет особенность распределения составляющих силы резания в зависимости от положения вершины резца на характерном участке профиля. Приведены формулы для расчета векторов составляющих силы резания.*

**Введение.** При взаимодействии режущего клина инструмента с обрабатываемым материалом при сложнопрофильном точении на контактных поверхностях возникают достаточно сложные распределения сил в направлениях, которые могут быть заменены их равнодействующими, приложенными в центрах тяжести соответствующих эпюр. Смещение этих сил по линиям их действия и переносы на режущую кромку (возможны из-за малых расстояний) позволяют произвести их геометрическое сложение в единую равнодействующую силу, называемую силой резания.

В решении многих технологических и конструкторских задач необходимо знание сил резания: определение необходимой мощности привода станка, прочностные расчеты при проектировании инструмента и отдельных деталей станка, определение точности обработки, расчёт режимов резания, применение адаптивных систем управления станком и др. В то же время при решении этих задач не всегда необходимо знать равнодействующую силу резания, а достаточно знания отдельных составляющих.

**Основная часть.** Поскольку для негативной пластины с углом при вершине  $90^0$  передний и задний углы равны, вместо заднего угла подставляем обозначение переднего угла  $\gamma$ . Влияние сил  $N_{\Pi}$ ,  $N_3$  и  $F_{T\Gamma}$ ,  $F_3$  на силы  $P_Z$  и  $P_{X\Upsilon}$  определяется уравнениями:

$$P_Z = (F_3 + N_{\Pi}) \cos \gamma + (F_{\Pi} + N_3) \sin \gamma \quad (1)$$

$$P_{X\Upsilon} = (F_{\Pi} + N_3) \cos \gamma + (F_3 + N_{\Pi}) \sin \gamma \quad (2)$$

Величина равнодействующей силы определяется по формуле:

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_{xy}^2} \quad (3)$$

Такое соотношение между составляющими сил резания (см. рис. 1) зависит от условий резания (геометрии резца и его износа, параметров режима резания, свойств обрабатываемого и инструментального материалов и т. д.) и не является постоянным. Например, при резании с малыми сечениями стружки отношение  $P_z/P_y$  уменьшается и при обработке конструкционных сталей в состоянии поставки равно примерно 1,5. Это объясняется тем, что при малой толщине среза силы, действующие на заднюю поверхность резца, близки по своим значениям к силам, действующим на его переднюю поверхность.

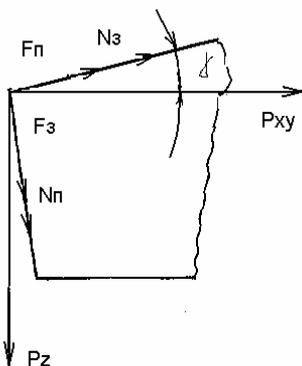


Рис. 1. Схема действия сил трения и нормального давления на составляющие  $P_z$  и  $P_{xy}$

Вследствие этого сила  $P_y$  относительно увеличивается, так как на нее оказывают большое влияние силы, действующие на заднюю поверхность резца. Отношение  $P_z/P_x$  повышается и при чистовой обработке стали равно пяти.

При обработке твердых износостойких материалов силы, действующие на заднюю поверхность резца, достигают сравнительно больших значений. Это объясняется тем, что они находятся в зависимости от действительного предела прочности поверхностного слоя обрабатываемого материала, которая тем выше, чем тверже металл. В этом случае сила  $P_y$  обычно превышает силу  $P_z$ . Так, при точении закаленной быстрорежущей стали твердостью  $HRC$  50—66 при  $t < 0,3$  мм сила  $P_y$  больше силы  $P_z$  примерно в 1,5 раза [1,2].

Если для расчета составляющей  $P_Z$  силы резания при обточке профиля детали основное значение имеет величина действительного сечения среза в проекции основной плоскости, поскольку эта составляющая всегда направлена по перпендикуляру к этой плоскости и для нее не имеет значения положение максимальной толщины среза на режущей кромке пластины, то для расчета составляющих  $P_X$  и  $P_Y$  силы резания, их равнодействующей  $P_{XY}$ , их скалярных и, особенно, векторных величин, имеет первостепенное значение знание положения максимальной толщины среза на режущей кромке пластины.

Для определения положения максимальной толщины среза на режущей кромке пластины необходимо произвести привязку этого положения и, соответственно, направления равнодействующей  $P_{XY}$  относительно одной из координат в основной плоскости, например, оси  $Y$ . Как видно из приведенного ниже рис. 2, направление равнодействующей  $P_{XY}$  и, соответственно, положения наибольшей толщины среза, будет зависеть в первую очередь от угла наклона  $\omega$  образующей профиля на каждом из характерных участков[2].

Как видно из представленной схемы и ранее приведенных расчетов, положение максимальной толщины среза при точении резцом, оснащенным круглой неперетачиваемой пластиной ПКНБ, будет определяться текущим главным углом в плане  $\varphi$ , соответствующим максимальной толщине среза на этом участке.

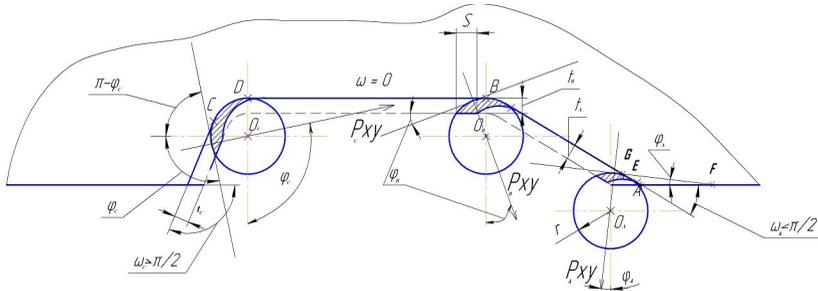


Рис. 2. Схема для расчета угла отклонения равнодействующей  $P_{XY}$  в основной плоскости

Для начала рассмотрим зависимость величины главного угла в плане  $\varphi_B$ , который расположен на горизонтальной образующей цилиндра, параллельной оси  $X$ , то есть, на цилиндрической части профиля впадины детали. Поскольку текущий угол наклона профиля

равен нулю, угол отклонения вектора равнодействующей  $P_{XY}$  составляющих  $P_X$  и  $P_Y$  силы резания будет равен главному углу в плане  $\varphi_B$  в точке пересечения направления измерения максимальной толщины среза с перпендикуляром к этому направлению, то есть, углу между касательной к окружности пластины к оси  $X$  в положении условной вершины резца в точке  $B$ . Значение угла находим по формуле [3]:

$$\varphi_B = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{t(2r-t)} - S}{r-t}; \quad (4)$$

где  $r$  – радиус режущей пластины, мм;  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – продольная подача, мм/об.

Все параметры, входящие в уравнение (4), измерены в направлении образующей профиля, то есть, параллельно оси  $X$ .

Для участка с положением условной вершины резца в точке  $A$  на наклонном участке при входе резца во впадину профиля с углом наклона образующей  $\omega_A$  находим значение угла из треугольника  $EFG$ :

$$\varphi_A = -\omega_A - \varphi_i; \quad (5)$$

где  $\omega_A$  – угол наклона образующей на рассматриваемом участке профиля;  $\varphi_i$  – главный угол в плане в точке максимальной толщины среза на рассматриваемом участке при измерении подачи в направлении образующей профиля на этом же участке.

$$\varphi_i = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2r-t_i} - S_i}{r-t_i}. \quad (6)$$

А с учетом угла наклона образующей профиля:

$$\varphi_A = \operatorname{arctg} \left[ \frac{S_A - \sqrt{t_A(2r-t_A)}}{r-t_A} - \omega_A \right], \quad (7)$$

где  $S_A$  – подача, измеренная в направлении образующей, мм/об.

На участке с условным положением вершины резца в точке  $C$ , то есть на выходе из впадины рассматриваемого профиля, главный угол в плане в точке максимальной толщины среза на рассматриваемом участке  $\varphi_C$  при измерении подачи в направлении образующей профиля на этом же участке с углом наклона  $\omega_C$ , определяется из уравнения:

$$\varphi_C = \omega_C + \varphi_i. \quad (8)$$

Тогда главный угол в плане в точке максимальной толщины среза на рассматриваемом участке  $\varphi_C$  определим из следующего равенства:

$$\varphi_C = \arctg\left[\frac{\sqrt{t_C(2r - t_C)} - S_C}{r - t_C} + \omega_C\right], \quad (9)$$

где величины подачи и глубины резания измерены соответственно в направлении образующей профиля и перпендикулярно ей.

Максимальные толщины среза на характерных участках заданного профиля могут быть рассчитаны по следующим формулам:

Для точки  $A$ :

$$a_{\max}^A = r + S_A \sin \varphi_A - \sqrt{r^2 - S_A^2 \cos^2 \varphi_A}. \quad (10)$$

Для точки  $B$ :

$$a_{\max}^B = r + S \sin \varphi - \sqrt{r^2 - S^2 \cos^2 \varphi}. \quad (11)$$

Для точки  $C$ :

$$a_{\max}^C = r + S_C \sin \varphi_C - \sqrt{r^2 - S_C^2 \cos^2 \varphi_C}. \quad (12)$$

Довольно часто для приближенного подсчета силы  $Pz$  пользуются значением удельной силы резания  $q_N$ . В этом случае  $Pz = A_{\Pi} q_N$ , где  $q_N$  — удельная сила резания, Н/м<sup>2</sup>,  $A_{\Pi}$  — площадь поперечного сечения среза, мм<sup>2</sup>.

Существует упрощенное представление о том, что мощность, затрачиваемая на резание, зависит от сил  $Pz$  и  $Px$ . В направлении действия силы  $Py$  (при отсутствии вибраций) движение не совершается. Работа, совершаемая силой  $Px$ , незначительна ввиду относительно малой величины подачи. Поэтому эффективная мощность, необходимая для осуществления резания при точении, определяется только по силе  $Pz$ :

$$N_{\text{э}} = Pz \cdot V \text{ Вт}, \quad (13)$$

где  $Pz$  — сила резания, Н;  $V$  — скорость резания, м/с.

Мощность электродвигателя станка

$$N_M = \frac{N_{\text{э}}}{\eta} \text{ Вт}, \quad (14)$$

где  $\eta$  — к. п. д. станка.

При положительном значении угла наклона главного лезвия и  $\lambda > \Delta_0$

$$P_y = P_{xy} \cos(\varphi \pm \Delta), \quad (15)$$

$$P_x = P_{xy} \sin(\varphi \pm \Delta). \quad (16)$$

Для резца с закругленной вершиной

$$P_y = P_{xy} \cos \Delta, \quad (17)$$

$$P_x = P_{xy} \sin \Delta. \quad (18)$$

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. *Klimenko S.A., Mukovoz Yu.A., Polonsky L.G.* Advanced Ceramics Tool for Machining Application-2 // Edit by I.M.Low and X.S.Li. – Chapter 1. Cutting Tools of Superhard Materials. –Switzerland: Trans Tech Publications, 1996. – P. 1–66.
2. Инструмент и технология точения фасонных поверхностей на станках с ЧПУ / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, А.С. Мано-вицкий, Г.П. Кудряков // Инструментальный світ. – 2005 – № 4 (28). – С. 4–7.
3. *Филоненко С.Н.* Резание металлов. – К.: Техника, 1975.– 232 с.

МАНОВИЦКИЙ Александр Степанович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием инструментом, оснащенным ПСТМ;
- обработка изделий с фасонным профилем.

Подано 19.09.2009