

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д о в н а р С.С. Выявление основных закономерностей напряженного состояния в зоне резания металла с помощью метода конечных элементов: Дис. ... канд. техн. наук. — Мн., 1987. — 210 с.
2. К у ф а р е в Г.Л., О к е н о в К.Б., Г о в о р у х и н В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. — Фрунзе, 1970. — 170 с.
3. Р а м а л и н г э м, Х а з р а. Динамическое напряжение сдвига. Анализ исследований процесса механической обработки монокристаллов // Тр. АОИМ. Конструирование и технология машиностроения. — 1973. — № 4. — С. 30–36.
4. Р е х т. Динамический анализ высокоскоростной обработки резанием // Тр. АОИМ. Конструирование и технология машиностроения. — 1985. — № 4. — С. 135–146.
5. П о д у р а е в В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. — М., 1974. — 587 с.
6. Я в о р с к и й Б.М., Д е т л а ф А.А. Справочник по физике. — М., 1979. — 944 с.
7. Л а н д а у Л. Д., Л и в ш и ц Е.М. Механика сплошных сред. — М., 1954. — 795 с.
8. Р ы б и н В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. — М., 1986. — 224 с.
9. Субструктура и свойства мартенсита конструкционных легированных сталей после деформирования по различным схемам / Л.С. Давыдова и др. — ФММ. — 1986. — Т. 61, вып. 2. — С. 339–347.

УДК 621.9:539.374

В.М. КУЦЕР (БПИ)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА СХОДА СТРУЖКИ ПРИ КОСОУГОЛЬНОМ РЕЗАНИИ

Большинство технологических процессов обработки деталей со снятием стружки относится к косоугольному резанию. Согласно гипотезе Г.И. Грановского [1], подтвержденной Н.Н. Зоревым [2] и В.Ф. Бобровым [3], в этом случае процесс резания происходит в плоскости стружкообразования, которая образована векторами скорости резания и скорости стружки. Это означает, что существует такое сечение, проходящее через обрабатываемый материал и стружку, в котором происходит процесс плоской деформации. Очевидно, нельзя считать, что в плоскости стружкообразования точно выполняются условия плоского деформирования. Однако, поскольку для углов наклона режущего лезвия  $\lambda < 30..40^\circ$  коэффициент уширения стружки  $K_v$  близок к единице [2, 3], эти условия выполняются с достаточной для практики точностью.

Действительный угол резания  $\delta$  в плоскости стружкообразования, вычисляемый по формуле [2]

$$\cos \delta = \cos \lambda \cos \nu \cos \delta_N + \sin \lambda \sin \nu,$$

зависит от угла наклона главной режущей кромки  $\lambda$ , нормального угла резания  $\delta_N$  и угла схода стружки  $\nu$ . Первые два параметра задаются геометрией инструмента, а для определения третьего требуются дополнительные сведения. Таким образом, если известны физико-механические свойства обрабатываемого материала, элементы режима резания и геометрия инструмента, задача косоугольного резания сводится к прямоугольному, теоретический анализ которого имеется в [4, 5].

Единственным свободным параметром в рассматриваемой модели косоугольного резания является угол схода стружки  $\nu$ . При малых скоростях ре-

зания  $\nu \approx \lambda$  [2, 3], однако при скоростях более 40...50 м/мин эти углы значительно отличаются [2]. Экспериментальная методика определения направления схода стружки, предложенная Н.Н. Зоревым [2], достаточно трудоемка, и полученные результаты годятся лишь для исследованной пары "инструмент— обрабатываемой материал", причем в узком диапазоне скоростей и для нескольких значений угла  $\lambda$ .

В данной работе предлагается методика теоретического определения угла схода стружки на основе энергетического подхода. Будем исходить из того, что угол  $\nu$  принимает такое значение, которое обеспечивает минимальные затраты энергии на осуществление процесса резания. Поскольку действительная скорость резания не зависит от положения плоскости стружкообразования, а энергия, затрачиваемая при резании в единицу времени, определяется произведением скорости резания на проекцию силы на направление этой скорости, задача сводится к минимизации силы резания по параметру  $\nu$ . Используем выражение для этой составляющей силы резания, полученное в [5]:

$$P = c\rho T_c + \frac{\bar{\mu}k}{\cos\bar{\eta}(\cos\bar{\eta} + \sin\bar{\eta})}, \quad (1)$$

где  $c$  и  $\rho$  — соответственно удельная теплоемкость и плотность обрабатываемого материала;  $T_c$  — температура в плоскости сдвига;  $\bar{\mu}$  — средний коэффициент пластического трения;  $k$  — предел текучести на сдвиг обрабатываемого материала;  $\bar{\eta} = 1/2 \arccos \bar{\mu}$ .

Выражение (1) получено для ортогонального резания и не включает затрат энергии на трение стружки о переднюю поверхность инструмента в направлении, параллельном режущей кромке.

Боковую скорость стружки определим из формулы [2]

$$v_l = v \cos \lambda \operatorname{tg} \nu / K_a,$$

где  $K_a$  — коэффициент утолщения стружки:  $K_a = \cos \bar{\eta} / \cos (\delta - \bar{\eta})$  [5].

Мощность, затрачиваемая на преодоление силы трения в направлении  $v_l$ , определится произведением этой скорости на касательное напряжение  $\bar{\tau}_k = \bar{\mu}k$  и площадь контакта, отнесенную к ширине режущего лезвия:

$$N_l = \bar{\mu}k \cos \lambda \operatorname{tg} \nu \cdot l_{\text{п}} v / K_a. \quad (2)$$

Здесь  $l_{\text{п}}$  — длина пластического контакта.

Из [4] имеем

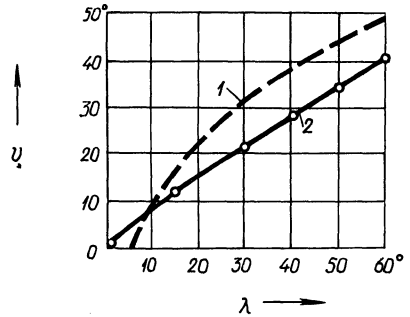
$$l_{\text{п}} v / K_a = va / [\cos \bar{\eta} (\cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta})]. \quad (3)$$

Тогда, подставляя выражение (3) в уравнение (2) и разделив полученное выражение на скорость резания и толщину срезаемого слоя, получим компоненту общей силы резания, учитывающую боковое трение:

$$P_l = \frac{\bar{\mu}k \cos \lambda \operatorname{tg} \nu}{\cos \bar{\eta} (\cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta})}.$$

Рис. 1. Зависимость угла схода стружки от угла наклона главного режущего лезвия для стали 45 ( $\gamma = 10^\circ$ ,  $a = 0,2$  мм,  $v = 100$  м/мин):

1 — теоретическая зависимость; 2 — кривая, построенная по результатам экспериментов [2]



Составляющая силы вдоль скорости резания

$$P = c\rho T_c + \frac{\bar{\mu}k}{\cos\bar{\eta}(\cos\bar{\eta} + \sin\bar{\eta})} (1 + \cos\lambda \operatorname{tg}\nu). \quad (4)$$

Температура стружки после прохождения зоны первичных деформаций определяется по формуле [5]

$$T_c = T_0 + \Gamma [1 + A\Gamma^m / (m + 1)] k_0 / (c\rho),$$

где  $T_0$  — начальная температура обрабатываемого материала;  $A$  и  $m$  — коэффициенты кривой упрочнения обрабатываемого материала;  $k_0$  — предел текучести на сдвиг при  $T = T_0$  и интенсивности сдвиговых деформаций  $\Gamma = 0$ .

Изменение свойств обрабатываемого материала будем учитывать с помощью зависимости [4]

$$k = k_0 (1 + A\Gamma^m) F(T),$$

сомножители которой отражают деформационное упрочнение и зависимость предела текучести от температуры. Здесь  $\Gamma = \sin\delta / \cos(\delta - \bar{\eta})$ .

Коэффициент пластического трения определяется из системы нелинейных уравнений [5] относительно  $\bar{\mu}$ ,  $\bar{\eta}$  и  $T_k$  (максимальной температуры на передней поверхности инструмента):

$$\bar{\eta} = 1/2 \arccos \bar{\mu};$$

$$\bar{\mu} \int_{T_c}^{T_k} \frac{T - T_c}{F^2(T)} dT = \int_{T_c}^{T_k} \frac{T - T_c}{F(T)} dT; \quad (5)$$

$$\frac{\rho c \Lambda}{2k^2} F^2(T_c) \cos\bar{\eta} (\cos\bar{\eta} + \sin\bar{\eta}) \int_{T_c}^{T_k} \frac{T - T_c}{F^2(T)} dT = va,$$

где  $\Lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Таким образом, выражение (4) является функцией угла  $\nu$ . Для определения значения угла схода стружки необходимо найти минимум функции (4).

Это можно сделать численно, используя, например, метод "золотого сечения". Параметры для соотношения (4) должны определяться путем решения на каждой итерации системы уравнений (5).

По предложенной методике проведен расчет для свободного косоугольного резания образца из стали 45. На рис. 1 представлена зависимость угла схода стружки  $\nu$  от угла  $\lambda$ , полученная из расчета, а также кривая, полученная экспериментально [2]. Расчет дает хорошее совпадение с результатами эксперимента для  $\lambda < 20^\circ$ .

На основании вышеизложенного видно, что параметры процесса свободного стружкообразования с углом  $\lambda \neq 0$  зависят от угла схода стружки, и поэтому приведенная методика может служить основой для теоретической оценки термомеханического режима неортогонального свободного резания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М., 1948. – 199 с.
2. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М., 1956. – 367 с.
3. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. – М., 1962. – 149 с.
4. Куцер В.М. Анализ процесса ортогонального резания с учетом переменных свойств обрабатываемого материала // Машиностроение. – Мн., 1988. – Вып. 13. – С. 8–15.
5. Куцер В.М. Теоретическая оценка сил при ортогональном резании // Машиностроение. – Мн., 1989. – Вып. 14. – С. 7–11.

УДК 621.91.02

В.А. ДАНИЛОВ,  
канд.техн.наук (НПИ)

#### СХЕМЫ РОТАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Ротационное резание, обеспечивая многократное повышение производительности обработки и стойкости инструмента [1], является эффективным методом обработки в автоматизированном производстве, что подтверждается его применением при изготовлении роторов и статоров электродвигателей. Однако этот метод еще не получил широкого применения, в частности, из-за сложности обеспечения стружкодробления при обработке пластичных материалов круглыми резами. В связи с этим создание схем и инструментов для ротационного резания, обеспечивающих надежное стружкодробление, имеет важное практическое значение.

Кинематические особенности ротационного резания позволяют осуществить стружкодробление способами, основанными на изменении классической кинематики ротационного точения. К ним относится резание с неравномерным вращением резца или вращением его вокруг оси, не совпадающей с его геометрической осью, с переменными параметрами режущей части резцов. Однако в первом случае усложняется конструкция устройства для ротационного точения и невозможна обработка при оптимальном соотношении угловых скоростей заготовки и резца, так как оно непрерывно изменяется. При вращении резца вокруг оси, не совпадающей с его геометрической осью, биение режущей