

Это было подтверждено опытами по ударному скальпированию на механическом копре образцов из стали У10 диаметром 16 мм и длиной 10 мм. Инструмент — режущая матрица с углами  $\alpha = \gamma = 0$ , имеющая антифрикционное покрытие из меди. Глубина резания  $t = 0,1 \dots 0,4$  мм. Диапазон скоростей резания от 190 до 530 м/мин обеспечивает для ультрадистых сталей приближение к адиабатическим условиям обработки [10]. Во всем диапазоне скоростей достигнуто высокое качество поверхности с параметром шероховатости не более 0,06 мкм. Обследование образцов на растровом электронном микроскопе с увеличением до 2000 раз не выявило на них следов поверхностных разрушений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Д о в н а р С.С. Численно-математическая модель для определения напряжений, возникающих при обработке металлов резанием // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. — 1985. — № 2. — С. 10–13.
2. П о л у х и н П.И., Г у н Г.Я., Г а л к и н А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. — М., 1983. — 352 с.
3. 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.
4. Я щ е р и ц ы н П.И., Д о в н а р С.С. Напряженно-деформированное состояние зоны стружкообразования в процессе врезания резца в металл // Машиностроение. — Вып. 10. — С. 3–6.
5. И в а т а, О с а к а д а, Т э р а с а к а. Моделирование процесса ортогонального резания методом конечных элементов для жестко-пластичного тела // Тр. АОИМ. Теоретические основы инженерных расчетов. — 1984. — № 2. — С. 24–31.
6. В е д м е д о в с к и й В.А. Исследование неровностей на обработанной поверхности при резании в условиях образования элементной стружки // Вопр. точности протягивания. — Рига, 1969. — С. 73–92.
7. Справочник по технологии резания материалов. — М., 1985. — Т. 1. — 616 с.
8. B l a c k J.T., R a m a l i n g a m S. Fine Structure of Machined Surfaces // Int. J. of Machine Tool Design and Research. — 1970. — Vol. 10, No 4. — P. 439–463.
9. А.с. 980900 (СССР). Ящерицын П.И., Довнар С.С. Способ чистовой обработки отверстий.
10. Б о б р о в В.Ф. Основы теории резания металлов. — М., 1975. — 344 с.

УДК 621.9:539.374

В.М. КУЦЕР

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИЛ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ РЕЗАНИИ

Определение уровня сил резания по результатам механических испытаний при минимальном количестве экспериментов имеет важное значение для оценки обрабатываемости новых материалов. Н.Н. Зорев получил теоретическую оценку для проекций сил резания при сверхнизких скоростях обработки [1]. Актуальной является задача определения сил при высоких скоростях резания, характерных для большинства видов механической обработки.

В работе [2] предложено решение этой задачи на основе поля линий скольжения Ли–Шаффера (рис. 1) [3], причем пластические свойства обрабатываемого материала описываются зависимостью

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

сомножители которой учитывают влияние деформационного упрочнения, а также температуры ( $T$ ) на предел текучести  $k$  обрабатываемого материала. Здесь  $\Gamma$  – интенсивность сдвиговых деформаций;  $k_0$  – предел текучести при сдвиге в состоянии  $\Gamma = 0, T = 0$ , относительно которого отсчитывается изменение параметров  $\Gamma$  и  $T$ ;  $A$  и  $m$  – коэффициенты кривой упрочнения;  $F(0) = 1$ .

Граничные условия на передней поверхности резца определяются тонким термическим слоем толщиной  $\delta_T$ , в котором локализуется тепловой эффект трения. Эквивалентный коэффициент пластического трения  $\bar{\mu}$  зависит только от свойств обрабатываемого материала и максимальной температуры в крайней точке пластического контакта  $T_K(s)$ , где  $s$  – длина площадки контакта:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{F(T_c)} \int_{T_c}^{T_K(s)} \frac{T_K - T_c}{F(T_K)} dT_K / \int_{T_c}^{T_K(s)} \frac{T_K - T_c}{F^2(T_K)} dT_K. \quad (2)$$

Коэффициент прандтлева трения  $\mu$ , определяемый парой трения "инструмент–стружка", учитывает влияние микронеровностей и адгезии в месте контакта инструмента и обрабатываемого металла и в условиях высоких локализации деформаций и давления на переднюю поверхность может быть принят равным единице.

Температура  $T_c$  обрабатываемого материала после прохождения линии сдвига определяется из уравнения [2]

$$\int_0^{T_c} \frac{dT}{F(T)} = \frac{k_0 \Gamma}{c\rho} \left( 1 + \frac{A\Gamma^m}{m+1} \right), \quad (3)$$

где  $c$  и  $\rho$  – соответственно удельная теплоемкость и плотность обрабатываемого материала.

Поскольку известно, что температура обрабатываемого материала после линии сдвига обычно не превышает 300...400 °С [4], а в этих пределах свойства сталей меняются незначительно [5], значит,  $F(T) \approx 1$ , и из формулы (3) получим приближенное выражение для вычисления температуры стружки:

$$T_c = \frac{k_0 \Gamma}{c\rho} \left( 1 + \frac{A\Gamma^m}{m+1} \right). \quad (4)$$

Из годографа (рис. 1, б) следует, что интенсивность сдвиговой деформации после прохождения линии разрыва

$$\Gamma = \sin \gamma / [ \cos \bar{\eta} \cdot \cos (\gamma - \bar{\eta}) ]. \quad (5)$$

Угол  $\bar{\eta}$  наклона  $a$ -линий скольжения определяется через приведенный коэффициент трения:  $\bar{\eta} = 1/2 \cdot \arccos \bar{\mu}$ . Из рис. 1, а, б следует

$$v_1 s = va / [ \cos \bar{\eta} ( \cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta} ) ]. \quad (6)$$

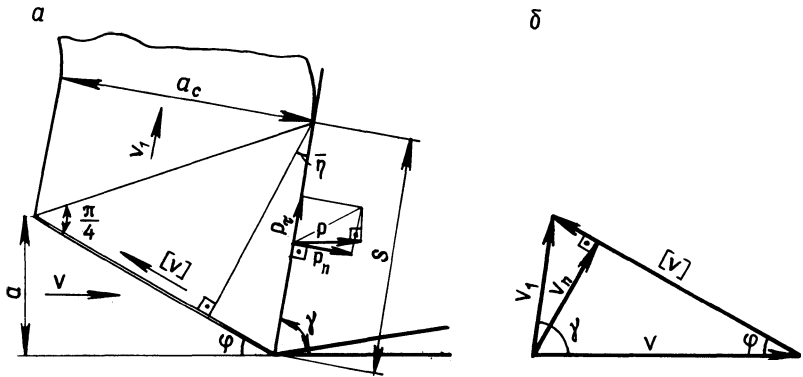


Рис. 1. Поле линий скольжения (а) и годограф скоростей (б) для решения Ли-Шаффера

Дадим верхнеграницную оценку составляющих силы резания. Для этого будем считать, что вся энергия деформирования превращается в теплоту.

Энергия, выделившаяся на линии сдвига в единицу времени, определит мощность сил резания, затраченную на этот сдвиг (на единицу ширины среза):

$$N_{\Gamma} = c\rho T_c v a .$$

Мощность сил трения на передней грани реза

$$N_s = \bar{\tau}_k s v_1 .$$

Эквивалентное касательное напряжение на передней поверхности инструмента пропорционально эквивалентному коэффициенту трения:  $\bar{\tau}_k = \bar{\mu}k$ .

Полная мощность резания на единицу ширины реза определится как сумма  $N_{\Gamma}$  и  $N_s$ . С учетом (6) будем иметь

$$N_{\Sigma} = v a \left\{ c\rho T_c + \bar{\mu}k / [\cos \bar{\eta} (\cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta})] \right\} .$$

Тогда усилие на резе в направлении резания

$$P = N_{\Sigma} / v = a \left\{ c\rho T_c + \bar{\mu}k / [\cos \bar{\eta} (\cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta})] \right\} . \quad (7)$$

Относительное значение силы резания с учетом (1) на единицу толщины среза

$$P_{уд} = c\rho T_c / k_0 + \bar{\mu} (1 + A\Gamma^m) F(T_c) / [\cos \bar{\eta} (\cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta})] . \quad (8)$$

(оставляющая силы резания, направленная вдоль передней грани реза,

$$P_{\tau} = \bar{\mu} k s = \bar{\mu} k a / [\cos (\gamma - \bar{\eta}) (\cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta})] \quad (9)$$

и ее относительное значение

$$P_{\tau} / (k_0 a) = \bar{\mu} (1 + A\Gamma^m) F(T_c) / [\cos (\gamma - \eta) (\cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta})] . \quad (10)$$

Поскольку составляющая в направлении движения резания является гео-

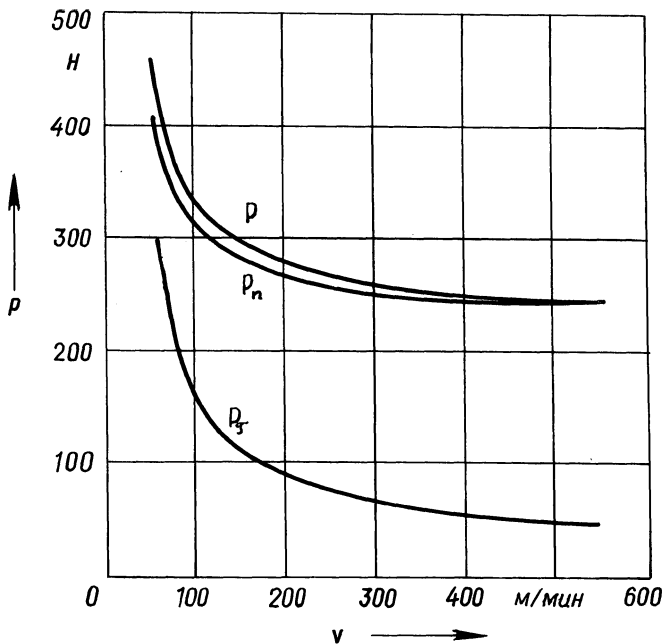


Рис. 2. Зависимости силы резания и ее составляющих от скорости резания

метрической суммой соответствующих нормальной и касательной проекций

$$P = P_n \sin \gamma + P_\tau \cos \gamma,$$

то нормальная составляющая силы резания

$$P_n = (P - P_\tau) \cos \gamma / \sin \gamma. \quad (11)$$

Поскольку все основные параметры поля линий скольжения можно выразить через угол  $\bar{\eta}$  или коэффициент  $\bar{\mu} = \cos(2\bar{\eta})$ , то, если заданы физико-механические свойства обрабатываемого материала, возможна следующая методика расчета верхнеграницных значений составляющих силы резания.

Задаем значения коэффициента трения  $\bar{\mu}$  в интервале от 0 до 1 с шагом, например, 0,05 и определим для них  $\bar{\eta} = 1/2 \cdot \arccos \bar{\mu}$ . По формуле (5) найдем интенсивность сдвига  $\Gamma$  для каждого  $\bar{\eta}$  и угла  $\gamma$ . Затем, используя формулы (4) и (1), вычисляем соответственно температуру  $T_c$  и предел текучести  $k$  обрабатываемого материала после прохождения плоскости сдвига. Далее из уравнений (7)–(11) можно определить силу резания и ее составляющие для толщины срезаемого слоя  $a$ , а также их удельные значения. Максимальную температуру в зоне контакта "инструмент–стружка"  $T_k(s)$  получаем из нелинейного уравнения (2). Скорости резания, соответствующие заданным коэффициентам  $\bar{\mu}$ , рассчитываются по формуле [3]

$$v = \rho c \lambda / (2k^2 a) \cos \bar{\eta} (\cos \bar{\eta} + \sin \bar{\eta}) \int_{T_c}^{T_k(s)} \frac{T_k - T_c}{F^2(T_k)} dT_k. \quad (12)$$

Здесь учтено, что  $F(T_c) \approx \mu \approx 1$ . Получив с использованием выражения (12) значение  $\bar{\mu}$  для заданной скорости резания, выбираем силу и ее составляющие, которые соответствуют этому  $\bar{\mu}$  (на единицу ширины срезаемого слоя).

Расчет по предложенной методике удобно осуществлять с применением ЭВМ, используя стандартные подпрограммы для численного интегрирования и решения нелинейных уравнений. Приведенные на графике (рис. 2) зависимости силы резания и ее составляющих от скорости резания при обработке детали из стали 45 (толщина среза  $a = 0,2$  мм, ширина среза  $b = 2$  мм) достаточно близки к реальному процессу.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Зорев Н.Н. Расчет проекций сил резания. — М., 1958. — 56 с.
- Куцер В.М. Анализ процесса ортогонального резания с учетом переменных свойств обрабатываемого материала // Машиностроение. — Мн., 1988. — Вып. 13. — С. 8–15.
- Lee E.H., Shaf fer V.W. The theory of plasticity applied to a problem of machining // Trans. ASME: J. Appl. Mech. — 1951. — No 18. — P. 405–413.
- Резников А.Н. Теплофизика резания. — М., 1969. — 288 с.
- Третьяков А.В., Трофимов Г.К., Гурьянова М.К. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. — М., 1971. — 64 с.

УДК 621.941.025

М.И. МИХАЙЛОВ

### КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОПОРНОЙ ГРАНИ РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЫ СБОРНОГО ИНСТРУМЕНТА

Дальнейшая автоматизация машиностроительного производства невозможна без автоматизации проектирования оснастки и режущего инструмента, которая требует совершенствования и разработки математических моделей, описывающих показатели прочности и жесткости сборных инструментов. Анализ работ [1, 2] по расчету контактных напряжений в сборном инструменте показывает, что еще недостаточно уделяется внимания анализу связи контактных напряжений с конструктивными и технологическими особенностями инструмента. Кроме того, использованные методики не позволяют учесть всех особенностей сборного инструмента. В настоящее время находит применение численный метод расчета контактных напряжений [3].

Рассмотрим методику расчета на примере канавочного резца. С целью упрощения он проводился по этапам: расчет контактных напряжений между ложементам (подкладкой) и державкой; расчет контактных напряжений между режущей пластиной и ложементам с заменой действия державки контактными напряжениями, полученными из расчетов предыдущего этапа.