

РАСЧЕТ СИЛ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТА СО СКРУГЛЕННОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ

Предложен метод расчета сил резания при обработке инструментом со скругленной режущей кромкой. Получены расчетные зависимости для определения проекций результирующей силы резания. Определено влияние радиуса закругления режущей кромки на численные значения составляющих силы резания и характер их изменения.

Существенная часть выходов из строя сменных многогранных пластин (СМП) режущего инструмента вызвана выкрашиванием и сколами режущей кромки. Разрушение режущей кромки вызвано превышением допустимых значений растягивающих напряжений на передней поверхности СМП. Одним из способов повышения прочности режущего клина является скругление острых кромок СМП. Скругление режущей кромки позволяет изменить направление результирующей силы резания и приблизить его к биссектрисе угла заострения режущего клина. Благодаря этому растягивающие напряжения на передней поверхности СМП уменьшаются или переходят в сжимающие. Однако чрезмерное увеличение радиуса скругления приводит к росту сил и температуры резания. Поэтому актуальной является задача определения рационального радиуса скругления режущей кромки. Для расчета напряжений на передней поверхности СМП и радиуса скруглений кромок СМП, при котором растягивающие напряжения на передней поверхности переходят в сжимающие, необходима методика расчета сил резания для инструмента со скругленной режущей кромкой. Традиционно применяемые и широко известные эмпирические формулы для определения сил резания и табличный метод не позволяют учесть величину радиуса скругления, и поэтому не пригодны для решения этой задачи.

Для расчета сил резания на режущем клине целесообразно выделить три участка, отличающихся физикой протекающих на них процессов контактирования (рис. 1):

- передняя поверхность (Π_1);
- задняя поверхность (Π_3);
- переходный радиусный участок (Π_2).

Определяя интересующие нас закономерности на каждом участке в отдельности и суммируя результаты, получим единую математическую модель.

При резании округленным режущим клином весь срезаемый слой рассматривается как совокупность трех частей (слоев), для которых отдельно определяются силы резания (рис. 2).

При движении инструмента его скругленный участок BD сжимает слой h_1 материала заготовки, в результате чего на задней поверхности инструмента возникает нормальная сила N_1 и сила $F_{тр1}$ трения. Согласно работе [1], толщина этого слоя может быть определена по формуле

$$h_1 = r \left[1 - \frac{1 + \mu}{\sqrt{2(1 + \mu^2)}} \right], \quad (1)$$

где r – радиус скругления режущей кромки; μ – коэффициент трения в окрестности точки D , приблизительно определяется по формуле

$$\mu \approx 80 / HB, \tag{2}$$

где HB – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю.

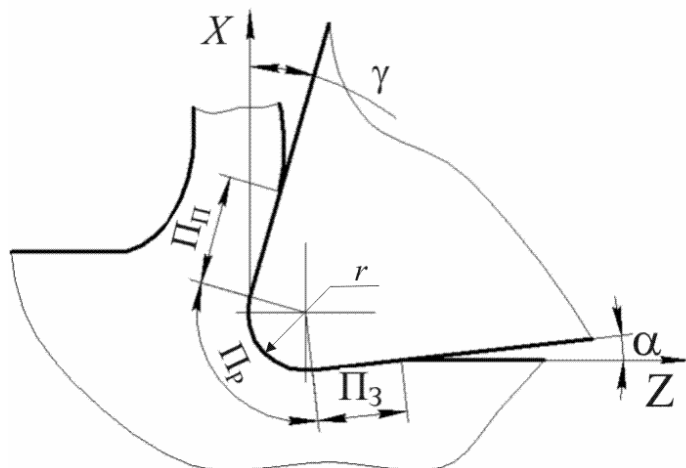


Рис. 1 Участки контакта на поверхности режущего клина

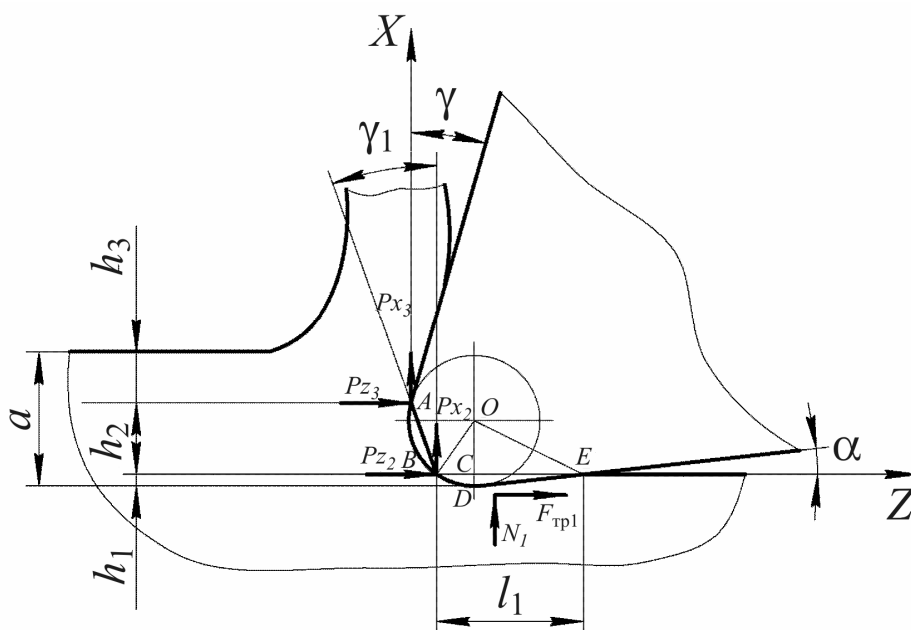


Рис. 2 Схема распределения припуска для инструмента со скругленной режущей кромкой

Для определения силы N_1 воспользуемся зависимостью из работы [2]:

$$N_1 = \frac{2h_1 E}{1 - \nu^2} \sqrt{bl_1}, \tag{3}$$

где E и ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона для обрабатываемого материала; b – ширина срезаемого слоя; l_1 – длина задней поверхности инструмента, контактирующей с обработанной поверхностью:

$$l_1 = BC + CE \approx \sqrt{r^2 - (r - h_1)^2} + h_1 \operatorname{ctg} \alpha. \quad (4)$$

Сила трения по задней поверхности равна

$$F_{\text{тр1}} = N_1 \mu. \quad (5)$$

Слой толщиной h_2 взаимодействует с радиусным участком инструмента и переходит в стружку, его толщина равна

$$h_2 = r + r \sin \gamma - h_1, \quad (6)$$

где γ – передний угол инструмента.

При этом для определения сил резания радиусный участок заменяется касательной фаской AB с передним углом γ_1 :

$$\gamma_1 = \arccos \left(\frac{h_2}{AB} \right). \quad (7)$$

Хорда

$$AB = 2r \sin \frac{\pi/2 - \angle BOD + \gamma}{2}, \quad (8)$$

$$\angle BOD = \arccos \left(\frac{r - h_1}{r} \right). \quad (9)$$

На срезаемый слой толщиной h_2 действует сила стружкообразования R_2 (рис. 3). Проекция силы резания на ось Z P_{z2} может быть определена по формуле [3]

$$P_{z2} = \tau \frac{h_2 b}{\sin \beta_1} \frac{\cos \omega_1}{\cos (\omega_1 + \beta_1)}, \quad (10)$$

где τ – касательное напряжение на условной плоскости сдвига, которое можно определить, воспользовавшись зависимостью Н. Н. Зорева [3]:

$$\tau = \frac{0,6 \sigma_B}{1 - 1,7 \psi_B}, \quad (11)$$

где σ_B – предел прочности; ψ_B – равномерное относительное сужение поперечного сечения образца; ω_1 – угол действия, который равен [3]:

$$\omega_1 = \arctg (f_{\text{тр}}) + \gamma_1, \quad (12)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; β_1 – угол сдвига.

Согласно Н. Н. Зореву [3], углы действия и сдвига взаимосвязаны, величина $c = \omega_1 + \beta_1$ постоянна и имеет следующие значения: при резании уг-

леродистых конструкционных сталей с содержанием углерода до 0,15% $c = 40^\circ$ и с содержанием углерода 0,15 – 0,5% $c = 46^\circ$,

$$\beta_1 = c - \omega_1. \quad (13)$$

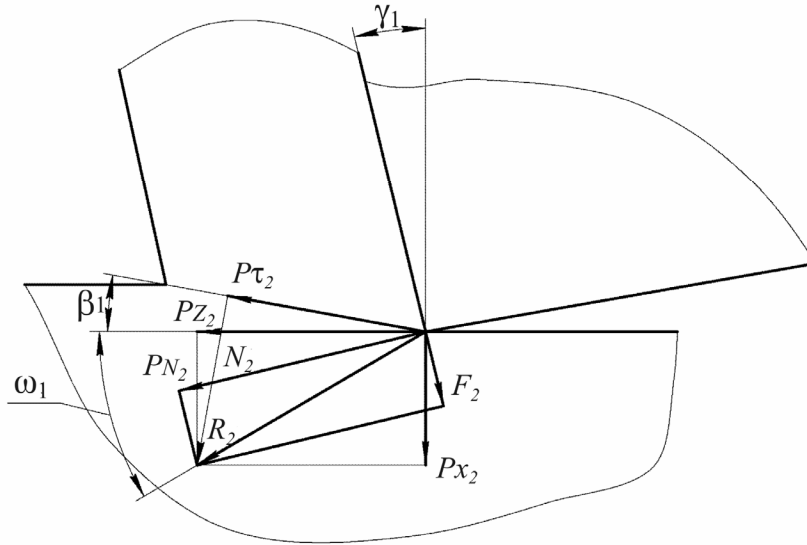


Рис. 3 Схема сил, действующих на радиусной поверхности инструмента

Проекция силы стружкообразования на ось X (рис. 3) Px_2 находится по формуле

$$Px_2 = \tau \frac{h_2 b}{\sin \beta_1} \frac{\sin \omega_1}{\cos(\omega_1 + \beta_1)}. \quad (14)$$

Основной характеристикой процесса контактирования двух поверхностей является коэффициент трения $f_{тр}$, представляющий собой отношение силы трения к нормальной силе. Можно считать, что характер контакта «инструмент–стружка» пластический [4, 5], т.к.:

– твердость инструментального материала, как правило, значительно выше твердости обрабатываемого материала, особенно в связи с разогревом последнего в процессе резания;

– высокие давления и температуры в зоне контакта способствуют внедрению микронеровностей поверхности режущего клина в материал стружки.

Коэффициент трения для пластического контакта [4]:

$$f_{тр} = f_{адг} + f_{мех}, \quad (15)$$

где $f_{адг}$ – адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения;

$f_{мех}$ – механическая составляющая коэффициента трения.

Согласно биномиальному закону молекулярного трения [4]:

$$f_{адг} = \frac{\tau_0}{P_r} + \beta_m, \quad (16)$$

где τ_0 – постоянное сдвиговое сопротивление молекулярной связи; β_M – пьезокоэффициент молекулярной составляющей коэффициента трения; p_f – фактическое давление, причем для пластического контакта,

$$p_f = k\sigma_T, \quad (17)$$

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала; k – коэффициент, учитывающий тип контакта, для пластического контакта $k = 3$ [4].

Механическая составляющая коэффициента трения:

$$f_{\text{мех}} = 0,55k_{vf}^n \Delta^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2p_c}{c\sigma_T} \right)^{\frac{1}{2v}}, \quad (18)$$

где p_c – контурное давление; Δ, v, k_{vf}^n – характеристики опорной кривой шероховатости. Для поверхностей, подвергнутых чистовой механообработке [4]:

$$\Delta \approx 0,01Ra, \quad (19)$$

$$v \approx 1,5 + 0,625Ra, \quad (20)$$

$$k_{vf}^n \approx 0,83 + 0,15v \approx 1,06 + 0,094Ra. \quad (21)$$

Контурное давление p_c в случае пластического контакта принимается равным пределу текучести обрабатываемого материала σ_T [4].

Слой толщиной h_3 отделяется в стружку под действием плоской части режущего клина с передним углом γ :

$$h_3 = a - r(1 + \sin \gamma), \quad (22)$$

где a – толщина срезаемого слоя.

Проекция силы резания на ось Z P_{z3} (рис. 4) может быть определена по формуле [3]

$$P_{z3} = \tau \frac{h_3 b}{\sin \beta} \frac{\cos \omega}{\cos(\omega + \beta)}, \quad (23)$$

где ω – угол действия, который равен [3]

$$\omega = \arctg(f_{\text{тр}}) - \gamma, \quad (24)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; β – угол сдвига,

$$\beta = 40 - \omega. \quad (25)$$

Проекция силы стружкообразования на ось X P_{x3} находится по формуле

$$P_{x3} = \tau \frac{h_3 b}{\sin \beta} \frac{\sin \omega}{\cos(\omega + \beta)}. \quad (26)$$

Таким образом, проекции суммарной силы резания на оси Z и X равны:

$$P_z = F_{\tau p1} + P_{z2} + P_{z3}; \quad (27)$$

$$P_x = N_1 + P_{x2} + P_{x3}. \quad (28)$$

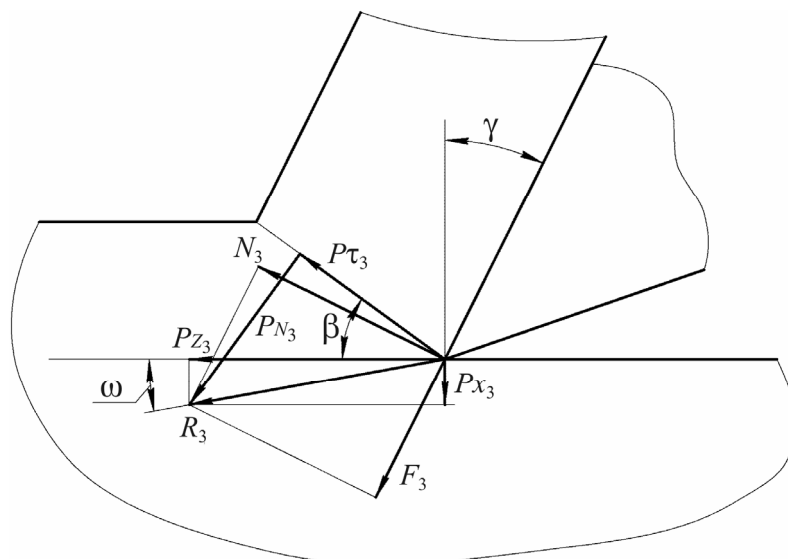


Рис. 4 Схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

Предлагаемая методика позволяет рассчитать силы резания, учитывая геометрические параметры инструмента (радиус скругления режущей кромки, передний и задний углы, шероховатость поверхностей), режимы резания и свойства обрабатываемого материала.

Результаты расчетов по предложенной методике приведены на рисунке 5.

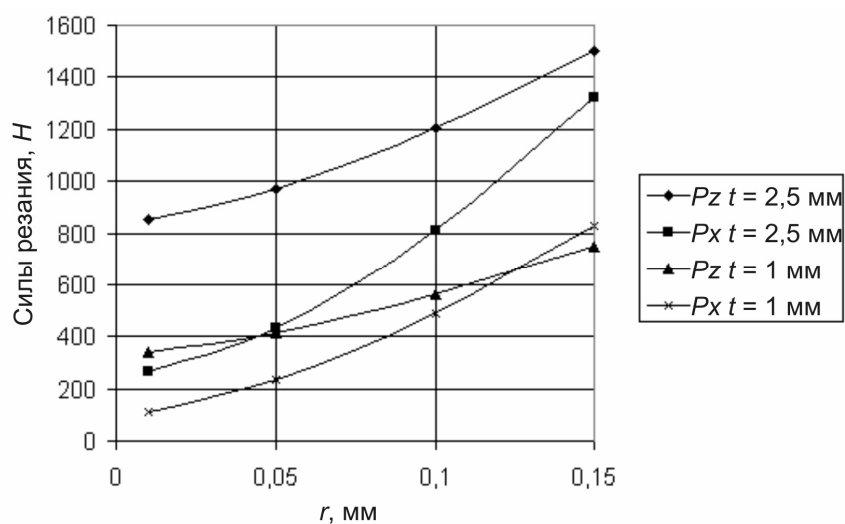


Рис. 5 Зависимость P_z и P_x от радиуса r округления режущей кромки СМП

Расчеты выполнены для следующих условий обработки: продольное точение; обрабатываемый материал – Сталь Ст 3; толщина срезаемого слоя – 0,26 мм; ширина срезаемого слоя – 2,5 мм и 1 мм; скорость резания – 48 м/мин; передний угол инструмента – 7°; задний угол инструмента – 8°; угол в плане – 90°; угол наклона режущей кромки – 0°. Как видно из графика, при увеличении радиуса скругления режущей кромки увеличиваются и силы резания, при этом сила P_x растет значительно быстрее, благодаря чему изменяется угол действия равнодействующей силы резания, и она смещается ближе к биссектрисе угла заострения, что ведет к изменению напряжений в режущем клине. С увеличением радиуса r округления режущей кромки растягивающие напряжения на передней поверхности инструмента уменьшаются и далее переходят в сжимающие.

Таким образом, полученная модель резания позволяет численно оценить влияние таких характеристик режущего инструмента, как радиус r округления режущей кромки, шероховатость Ra рабочих поверхностей на силы резания и может быть использована для определения значения радиуса r округления режущей кромки, при котором растягивающие напряжения на передней поверхности инструмента становятся сжимающими.

Список литературы

1. **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машгиз, 1962. – 383 с.
2. **Галин, Л. А.** Контактные задачи упругости и вязкоупругости / Л. А. Галин. – М. : Наука, 1980. – 256 с.
3. **Бобров, В. Ф.** Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
4. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Камбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
5. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2-х кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М. : Машиностроение, 1978. – 1 кн. – 400 с.
6. **Ящерицен, П. И.** Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицен [и др.]. – Мн. : Выш. шк., 1990. – 512 с.
7. Развитие науки о резании металлов / под ред. Н. Н. Зорева. – М. : Машиностроение, 1967. – 416 с.