

УДК 621.002:536.2

В.С.КУШНЕР, А.В.БОЯРНИКОВ, К.В.КОСТИН

К РАСЧЕТУ СИЛ ПРИ НЕСВОБОДНОМ КОСОУГОЛЬНОМ ТОЧЕНИИ

Описана методика теоретического учета влияния формы режущих кромок в плане и наклона их в плоскости резания на силы при точении, основанная на интегрировании приращений сил, вычисленных при допущении о том, что плоскость стружкообразования перпендикулярна режущей кромке в каждой ее точке. Приведены примеры применения этой методики к расчету сил при чистовом и черновом точении.

Совершенствованию методов расчета сил резания уделялось большое внимание многими исследователями. Значительный вклад в решение этой проблемы внесли ученые Томской школы резания материалов ([1, 4, 5] и др.). Раздельный учет сил на передней и задней поверхностях инструмента, использование соотношений между физическими и технологическими проекциями силы резания, вытекающими из условий равновесия, гипотез о связи средних касательных напряжений при резании с прочностными характеристиками материала при растяжении позволили на определенном этапе говорить о решении проблемы теоретического расчета сил резания [4]. Однако с течением времени выяснилось, что многие аспекты этой проблемы все еще требуют дополнительных исследований. Так, например, данные об усадке стружки и длине контакта стружки с резцом в большинстве случаев приходится брать из опыта. Не учитываются особенности косоугольного резания, особенности резания инструментами с упрочняющими и стабилизирующими фасками, инструментами с криволинейными кромками или кромками в виде ломаной линии.

Известные методы расчета сил отличаются, прежде всего, подходами к определению удельных сил резания K_ξ и K_v . В одном из широко распространенных подходов, удельные силы резания K_ξ и K_v выражались через коэффициент трения (или угол действия), усадку стружки ζ и средние касательные напряжения в условной плоскости сдвига τ_y . Однако гипотезы о связи угла действия с углом наклона зоны стружкообразования и коэффициента трения с температурой не получили необходимых обоснований. Поэтому вместо угла действия ω (или коэффициента трения) целесообразно использовать непосредственно сведения о средних касательных напряжениях q_F на передней поверхности и относительной длине контакта c/a стружки с резцом

$$K_\xi = \frac{\tau_y}{S_b} \varepsilon_u + \frac{q_F c}{S_b a} \frac{1}{\zeta}, \quad K_v = \frac{q_F c}{S_b a} \frac{1}{\zeta} \frac{\zeta - \sin \gamma}{\cos \gamma} - \frac{\tau_y}{S_b} \varepsilon_u \operatorname{tg} \gamma, \quad \text{где } \varepsilon_u = \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma}, \quad (1)$$

где ε_u - истинный сдвиг в зоне стружкообразования, γ - передний угол.

Преимущества такого подхода состоят в том, что простая замена относительной длины контакта c/a на относительную ширину стабилизирующей фаски f/a позволяет распространить формулы для расчета сил резания на часто использующиеся на практике инструменты с ограниченной длиной контакта (со стабилизирующими фасками на передней поверхности), а также в том, что средние касательные напряжения на передней поверхности могут быть с необходимой точностью вычислены с учетом влияния температуры по имеющимся программам [3].

Искусственное ограничение и укорочение длины контакта стружки с резцом позволяют уменьшить усадку стружки, а также снизить влияние условий резания на изменения усадки стружки [3]. Только для схем резания инструментом с укороченной передней поверхностью возможно теоретическое определение усадки стружки из условия минимума

мощности стружкообразования. Так, при допущении о постоянстве средних касательных напряжений ранее была получена формула (2)

$$\zeta = \sqrt{1 + \frac{q_F f}{\tau a}}. \quad (2)$$

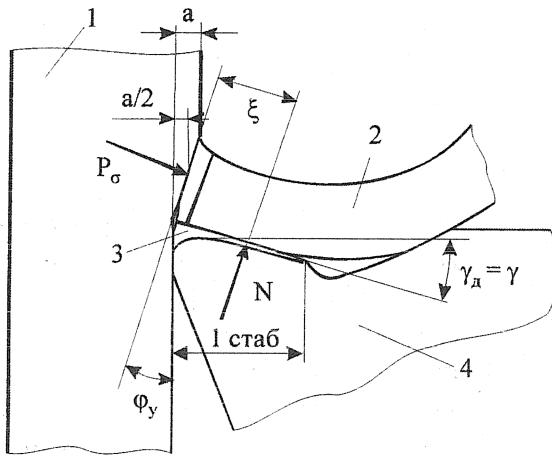


Рис.1. Схема, иллюстрирующая условие равенства моментов сил, действующих на стружку при резании инструментом со стабилизирующей фаской

Часть необходимых для расчета исходных данных о свойствах обрабатываемого материала (твердость НВ в МПА и относительное удлинение δ), о режиме резания (скорость резания и подача), о геометрических параметрах резца, размерах заготовки и детали, а также о схеме резания (со стабилизирующей фаской, укороченной или полной передней поверхностью) вносятся в ячейки таблицы формы, представленной на рис. 2. Результаты расчета усадки стружки, рекомендации по выбору рациональных параметров инструмента и сведения об удельных силах резания заносятся автоматически в нижнюю часть формы (рис.3.) после нажатия на клавишу «рассчитать усадку, фаски».

Одно из направлений совершенствования методов расчета сил резания связано с учетом влияния на силы резания наклона и формы режущих кромок (рис.4).

В данной работе с целью учета особенностей несвободного и косоугольного резания принято допущение о том, что плоскость стружкообразования перпендикулярна режущей кромке в каждой ее точке. Систему координатных осей $u\xi$, связанную с плоскостями стружкообразования и резания, расположим таким образом, чтобы в плоскости резания ось ξ была перпендикулярна, а ось u направлена по касательной к режущей кромке. Будем считать, что в плоскости стружкообразования находится равнодействующая приращения

Материал заготовки		Режимы резания		Передняя поверхность	
НВ	δ	V	S	<input checked="" type="radio"/> Укороченная	<input type="radio"/> Стабилизирующая
2000	0.150	30	1.20	<input type="radio"/> Полная	
Параметры инструмента					
γ	γ_f	φ	$h3$	l/a	α
10	-10	70	0.100	1.000	10
					$\gamma_{\text{доп}}$
					20
				$h3_{\text{ нач}}$	0.000
				R	30.000
				λ	5.0
Параметры детали					
Проточить поверхность		D _з max	D _з min	D _д max	D _д min
		680.000	620.800	604.00	600.000
		L max	R ₂	2000.0	
				80	

Рис.2. Форма задания исходных данных для расчета усадки стружки, сил и других характеристик процесса резания

силы на передней поверхности, заданная своими двумя проекциями (ΔR_v , ΔR_ξ)

$$\Delta R_v = K_v S_b a_x \Delta l; \quad \Delta R_\xi = K_\xi S_b a_x \Delta l, \quad (3)$$

где S_b - действительный предел прочности обрабатываемого материала при растяжении, a_x - толщина срезаемого слоя в окрестности Δl точки режущей кромки, соответствующей координате x (рис. 4.).

Усадка стружки и оптимальные геометрические параметры инструмента									Удельные силы резания	
ξ	γ_s	$\varphi_{пк}$	L_s	$L_{пк}$	R	L_p	$f_{упр}$	$f_{стаб}$	K_v	K_ξ
1.5	-10	5	2.100	2.100	12.00	7.901	0.688	1.96	1.191	2.784

Рис.3. Результаты расчета усадки стружки, оптимальных параметров инструмента и удельных сил резания при точении инструментом со стабилизирующей фаской

С основной плоскостью и плоскостью резания связана система координат $u_d z$, которую можно получить поворотом системы координат $u_d \xi$ относительно оси u на угол λ (рис. 4). В главной секущей плоскости v, z , находится равнодействующая приращения силы на задней поверхности, заданная также двумя проекциями (ΔN_1 , ΔF_1) (рис. 4)

$$\Delta N_1 = \sigma_b h_3 \Delta l; \quad \Delta F_1 = \mu_1 \sigma_b h_3 \Delta l. \quad (4)$$

Система технологических осей координат x, y, z , связанная с рабочей плоскостью и плоскостью резания, может быть получена поворотом системы координат $u_d z$, на угол в плане φ_x относительно оси z . Изменения геометрических параметров инструмента и толщины срезаемого слоя дают основание рассматривать приращения силы на передней поверхности (ΔR_v , ΔR_ξ) и силы на задней поверхности инструмента (ΔN_1 , ΔF_1) на отдельном элементарном участке режущей кромки в виде векторных функций, зависящих от координаты x . При этом проекция силы на задней поверхности на основную плоскость представлена только одно составляющей (ΔN_1), а проекция силы на передней поверхности – двумя составляющими (ΔR_v , $\Delta R_{\mu 0}$). Поэтому проекция приращения силы на передней поверхности на основную плоскость при косоугольном резании не совпадает с нормалью к проекции режущей кромки в основной плоскости (рис. 4). Этот факт хорошо известен из экспериментальных наблюдений. Описанная схема сил позволяет учесть его теоретически.

Согласно схеме (рис. 4) приращения технологических составляющих силы резания связаны с приращениями сил на передней и задней поверхностях формулами

$$\Delta P_x = \Delta R_v \sin \varphi_x - \Delta R_\xi \sin \lambda \cos \varphi_x + \Delta N_1 \sin \varphi_x; \\ \Delta P_y = \Delta R_v \cos \varphi_x + \Delta R_\xi \sin \lambda \sin \varphi_x + \Delta N_1 \cos \varphi_x, \quad \Delta P_z = \Delta R_\xi \cos \lambda + \Delta F_1, \quad (5)$$

где приращения сил определяются выражениями (3) и (4). Приращения длины кромки, толщина срезаемого слоя и сами тригонометрические функции зависят от формы режущей кромки, которая должна быть задана уравнением $y=y(x)$.

Так, например, при чистовом точении резцом с закругленной режущей кромкой по дуге окружности

$$y = r - \sqrt{r^2 - x^2}, \quad (6)$$

приращение длины режущей кромки, толщина срезаемого слоя и тригонометрические функции угла в плане выражаются через переменную интегрирования с помощью следующих функций

$$\Delta l = \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta x, \sin \varphi_x = \frac{x}{r}, \cos \varphi_x = \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{r}, a_x = \frac{sx}{r}. \quad (7)$$

Интегрируя, уравнения (5) в пределах изменения переменной x от $x_1=0$ до $x_2=\sqrt{t(2r-t)}$ (при $t < r$), получим формулы для расчета технологических составляющих силы резания

$$P_x = \frac{K_v S_b S}{r} \left(\frac{r^2}{2} \arcsin \frac{\sqrt{t(2r-t)}}{r} - (r-t) \frac{\sqrt{t(2r-t)}}{2} \right) + \frac{K_\xi S_b S t(2r-t)}{r} + \sigma_b h_3 t, \quad (8)$$

$$P_y = \frac{K_v S_b S t(2r-t)}{r} - \frac{K_\xi S_b S \sin \lambda}{r} \left(\frac{r^2}{2} \arcsin \frac{\sqrt{t(2r-t)}}{r} - (r-t) \frac{\sqrt{t(2r-t)}}{2} \right) + \sigma_b h_3 \sqrt{t(2r-t)}, \quad (9)$$

$$P_z = K_\xi S_b S t \cos \lambda + (\mu \sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) r \arcsin \frac{\sqrt{t(2r-t)}}{r}. \quad (10)$$

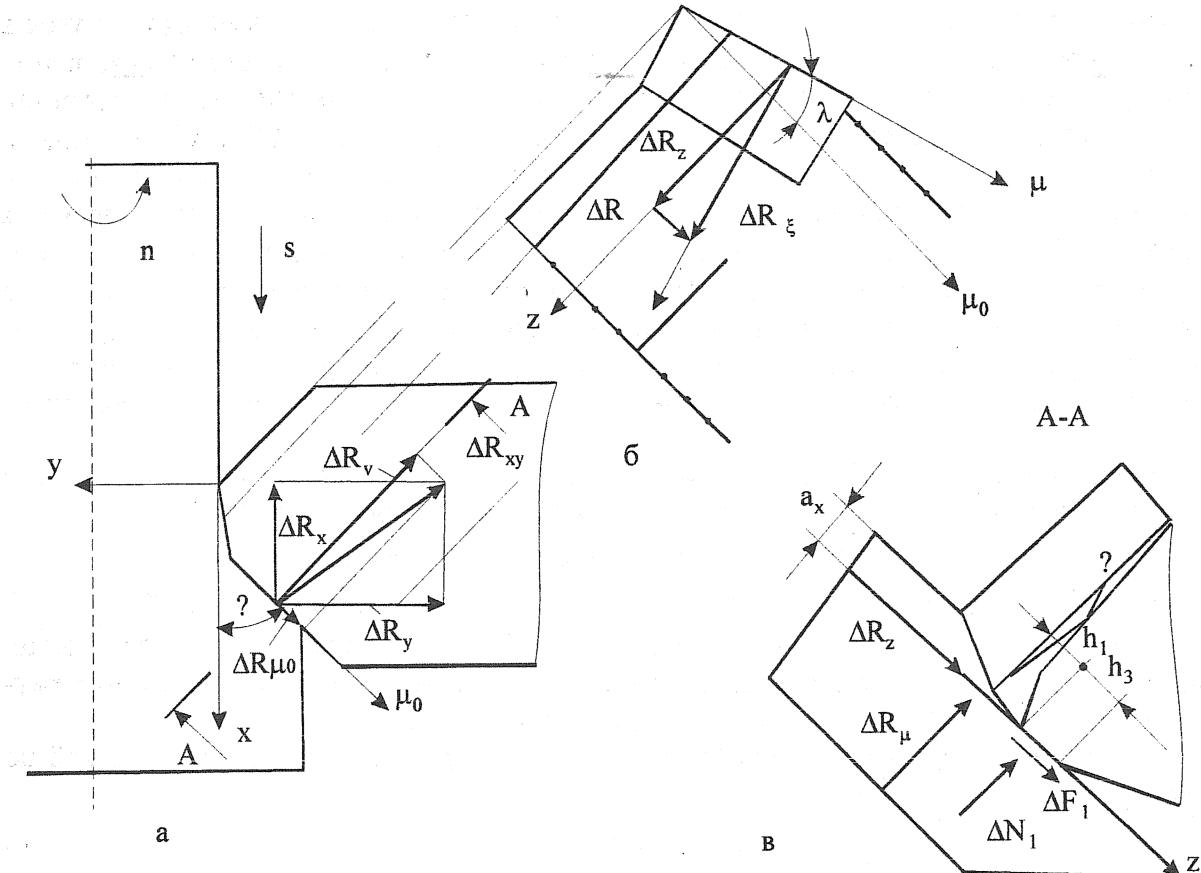


Рис.4. Схема приращений сил на прямолинейном участке режущей кромки при косоугольном точении:
а) в основной плоскости, б) в плоскости резания, в) в главной секущей плоскости

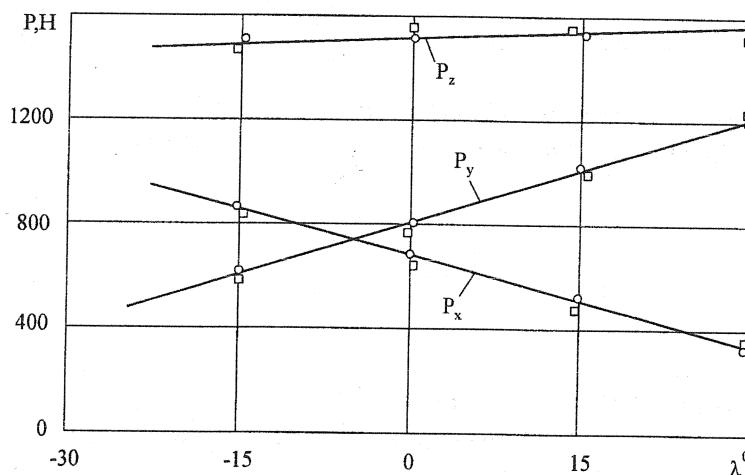


Рис.5. Сопоставление сил рассчитанных по предлагаемым зависимостям (квадратные точки) с измеренными при точении стали 45 резцом T15K6: $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $V = 143$ м/мин, $S = 0.307$ мм / об, $t = 3$ мм (круглые точки) [2]

щающими кромками и с упрочняющими и стабилизирующими фасками на передней поверхности (рис. 6).

В рассматриваемом примере вся область интегрирования может быть разбита на 5 интервалов (рис.6.): $(0, x_1)$ (x_1, x_2) , (x_2, x_3) , (x_3, x_4) , (x_4, x_5) , где при длине зачищающей кромки $l_s = K_s s$ и длине переходной кромки (вдоль оси x) l_n

$$\begin{aligned} x_1 &= (K_s - 1)s, \quad x_2 = K_s s, \quad x_3 = K_s s + l_n, \\ x_4 &= K_s s + l_n + s \sin^2 \varphi, \quad x_5 = K_s s + l_n + (t - l_n \tan \varphi) \operatorname{ctg} \varphi \end{aligned} \quad (11)$$

При этом угол в плане равен

$$\varphi_x = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_2, \\ \varphi_n & \text{при } x_2 < x \leq x_3, \\ \varphi & \text{при } x_3 < x \leq x_5. \end{cases} \quad (12)$$

На участке $x_1 = (K_s - 1)s$ толщина срезаемого слоя равна нулю ($a_{x1}=0$) и поэтому действуют только силы на задней поверхности. Приращения этих сил могут быть вычислены по формулам (3) при $\Delta l = x_1$. При этом

$$\Delta P_{x1} = 0, \quad \Delta P_{y1} = \Delta N_1, \quad \Delta P_{z1} = \Delta F_1. \quad (13)$$

На втором участке (x_1, x_2) длиной, равной подаче s , кроме сил на задней поверхности, определяющихся так же, как на первом участке, действуют силы на передней поверхности. Особенность расчета приращений сил на передней поверхности на этих интервалах связана с определением толщины срезаемого слоя

В формуле силы P_z учтена касательная сила на задней поверхности не только фаски износа шириной h_3 , но и застойной зоны, высота которой равна h_1 (рис. 4).

Сопоставление результатов теоретического расчета сил резания с экспериментальными данными, полученными В.Ф. Бобровым [2], показало, что теоретические формулы (7-9) правильно учитывают влияние угла λ наклона режущей кромки (рис. 5).

Описанный подход был применен и к расчету сил резания при черновом точении сталей резцами с прямолинейными режущими, переходными и зачищающими фасками на передней поверхности (рис. 6).

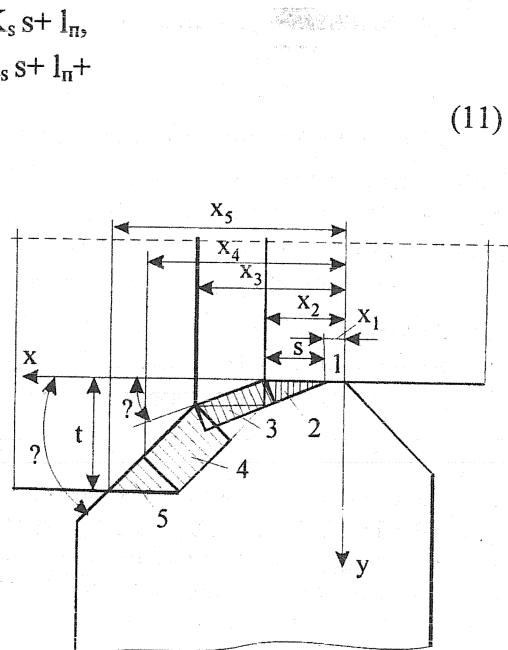


Рис. 6. Схема разбиения сечения слоя, срезаемого резцом с прямолинейными зачищающей, переходной и главной режущими кромками на пять областей интегрирования

$$a_{x1}=0, a_{x2}=(x-x_1)\sin\phi_n, a_{x3}=s \sin\phi_n, \quad a_{x4}=s \sin\phi, \quad a_{x5}=\frac{(x_5-x)\sin\phi}{\cos^2\phi}. \quad (14)$$

Таким образом, для точения резцом с прямолинейными главной, переходной и зачищающей кромками технологические проекции силы резания вычисляются по формулам (15) с учетом (5), (11) –(14)

$$P_x = \sum_{i=1}^5 \Delta P_{xi}, \quad P_y = \sum_{i=1}^5 \Delta P_{yi}, \quad P_z = \sum_{i=1}^5 \Delta P_{zi}. \quad (15)$$

Результаты расчета сил резания, вычисляются при нажатии соответствующей клавиши «рассчитать силы резания» и заносятся в соответствующие таблицы формы (рис.7,8.). На рис.7 представлены данные о наибольших силах.

Параметры среза		Проекции сил резания на технологические оси			
t	a	Px	Py	Pz	ψ
40.000	1.128	28845	19736	98673	58

Рис.7. Результаты расчета глубины резания, толщины среза, проекций силы резания на технологические оси и угла схода стружки в основной плоскости

(минимальные)		
Px	Py	Pz
5549	4120	19976

Рис.8. Минимальные технологические составляющие силы резания

Аналогичные сведения (в Н) приводятся и о минимальных силах (рис.8).

Выводы

Расчет сил резания при несвободном косоугольном резании целесообразно выполнять путем интегрирования с учетом формы и наклона режущей кромки проекций на технологические оси приращений сил резания в плоскости стружкообразования и сил на задней поверхности в главной секущей плоскости.

Усадка стружки при резании инструментом с укороченной передней поверхностью может быть теоретически вычислена с учетом влияния температуры на предел текучести из условия минимума мощности стружкообразования и равномерности эпюры распределения нормальных напряжений на укороченной передней поверхности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов.-М.: Машгиз, 1956.- 368 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. -М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Кушнер В.С. Основы теории стружкообразования. В 2-х кн. Кн.1.:Механика резания, Кн.2.: Теплофизика и термомеханика резания: Учеб.пособие.-Омск: Изд-во ОмГТУ, 1996.-265 с.
4. Развитие науки о резании металлов. -М.: Машиностроение, 1967, -416 с
5. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 319 с.