

УДК 621.941.1

Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов

Грубый С.В.^{1,*}

^{*}grusv@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Основой теоретического анализа различных видов механической обработки резанием, помимо кинематики и геометрических параметров инструмента, являются параметры стружкообразования и силы резания. Расчет этих параметров позволит перейти к теплофизическим задачам, анализу износа и стойкости инструмента, точности, качеству и производительности обработки. Отличительной особенностью предложенной методики является использования расчетного метода для определения параметров стружкообразования и сил резания. Рассматриваемая предметная область ограничена обработкой пластичных материалов (конструкционных углеродистых и легированных сталей, и алюминиевых сплавов) в условиях свободного прямоугольного резания с возможностью последующего перехода к несвободному косоугольному резанию, например, для инструментов с несколькими режущими кромками.

Последовательность расчетов организована в разработанной пользовательской программе на алгоритмическом языке программирования с результатами, представленными в графическом или табличном виде. Расчетная методика является структурной составляющей теории резания и предназначена для использования при проведении научных исследований и инженерных расчетов в этой предметной области.

Ключевые слова: стружкообразование, угол сдвига, коэффициент укорочения стружки, относительный сдвиг, сила стружкообразования, сила резания

Введение

Резание металлов как научная область исследований включает целый ряд разделов, среди которых стружкообразование и механика резания занимает важное место. Учитывая, что процесс резания собственно и есть процесс отделения поверхностного слоя заготовки в виде стружки, параметры стружкообразования являются специфическими и используются для расчета основных показателей процесса, в том числе и сил резания. Поэтому совершенствование методов для расчета этих параметров является актуальной научно-технической задачей.

Основы современного расчета параметров и показателей процесса резания заложены, начиная с середины двадцатого столетия, и отражены в ряде монографий. Например, в обобщенном виде «классический» подход к резанию металлов представлен в коллективной монографии «Развитие науки о резании металлов» (1967 г.), среди авторов которой известные ученые Н.Н. Зорев, Г.И. Грановский, М.Н. Ларин, Т.Н. Лоладзе, И.П. Третьяков, М.Ф. Полетика, А.Н. Резников, А.И. Бетанели и др. Положения науки трансформированы и представлены в монографиях, учебниках и учебных пособиях, среди которых следует выделить известные работы В.Ф. Боброва, Г.И. Грановского, не потерявшие свою актуальность до настоящего времени. Из иностранных авторов, переведенных на русский язык, можно отметить таких как Е.М. Трент, И.Дж.А. Армарега, Р.Х. Браун.

Применительно к вопросам стружкообразования и силам резания в этих источниках рассмотрена модель с единственной плоскостью сдвига, которая при всех известных недостатках представляет возможность для количественной оценки параметров и показателей процесса. Эта модель обоснованно использована и в современных литературных источниках по резанию металлов отечественных и зарубежных авторов, среди которых следует отметить [1-9]. Показана также возможность распространить и уточнить модель с единственной плоскостью (поверхностью) сдвига для несвободного косоугольного резания в работах автора, например, [10-11]. Таким образом, целью рассматриваемой расчетной методики является формулировка последовательности расчетов параметров стружкообразования и сил резания, основанной на «классическом» и современном представлении механики резания, применительно к задачам и уровню исследовательского характера, и инженерным расчетам.

Новизной предлагаемого методического подхода можно считать то, что расчет параметров и сил резания не требует проведения экспериментальных исследований, и основан на использовании известных механических характеристик обрабатываемого и инструментального материалов. Результатами расчетов являются параметры: угол сдвига, коэффициент укорочения стружки, относительный сдвиг, коэффициент трения на передней поверхности, силы резания и др.

Методические указания состоят из взаимосвязанных структурных составляющих: расчет параметров стружкообразования, расчет сил резания, справочные материалы, условия и задание, пример оформления результатов расчета, заключение, список литературы. Использованные формулы заимствованы из литературных источников, ссылки на которые приведены в работах [10-11].

1. Расчет параметров стружкообразования

Узловым моментом модели процесса стружкообразования является определение положения поверхности сдвига, длины контакта стружки, сил и распределений контактных нагрузок на поверхностях лезвия. Общепринятой в теории резания является модель стружкообразования пластичных материалов с «условной плоскостью сдвига». Эта модель экспериментально обоснована с использованием метода делительных сеток или по

шлифам корней стружек. Расчетные методы параметров стружкообразования в той или иной степени используют значение угла сдвига [2–6].

Угол сдвига отражает наклон условной плоскости сдвига к направлению скорости резания и определяется по выражению, которое прошло проверку при решении ряда задач механики резания, и имеет вид

$$\beta' = \operatorname{arccctg} \left[\frac{k_1 \cdot \sqrt[4]{(\eta_0 E_1 b / a)} + \cos \gamma - \sin \gamma}{\cos \gamma + \sin \gamma} \right], \quad (1)$$

где коэффициент k_1 отражает влияние скорости резания; упругая постоянная двух соприкасающихся тел равна $\eta_0 = (1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2$; E_1, E_2 – модули упругости обрабатываемого и инструментального материалов; μ_1, μ_2 – соответствующие коэффициенты Пуассона; a, b – толщина и ширина срезаемого слоя; γ – передний угол инструмента.

Связь коэффициента k_1 со скоростью резания v , м/мин определена эмпирическим уравнением $k_1 = 4,02 \cdot v^{-0,355}$.

Коэффициент укорочения стружки рассчитан с использованием известной формулы Тиме и угла сдвига по (1):

$$K_L = (\cos \gamma \cdot \operatorname{ctg} \beta' + \sin \gamma) \cdot k_2 \quad (2)$$

где коэффициент k_2 учитывает влияние свойств обрабатываемого материала по выражению $k_2 = 1,05(\tau_p / 500)^{-1,085}$, τ_p – величина касательного напряжения в плоскости сдвига. Для алюминиевых сплавов коэффициент k_2 принят равным единице.

Касательное напряжение в плоскости сдвига пропорционально пределу прочности обрабатываемого материала, т.е. $\tau_p = k_m \sigma_b$, а коэффициент находится в пределах $k_m = 0,8 \div 1,1$ в зависимости от группы обрабатываемого материала по данным С.С. Силина.

В окончательном виде расчетная величина среднего угла сдвига откорректирована с учетом влияния скорости резания и свойств обрабатываемого материала:

$$\beta = \operatorname{arccctg}[(K_L - \sin \gamma) / \cos \gamma], \quad (3)$$

где коэффициент укорочения K_L – по выражению (2).

Угол действия есть угол между результирующей силой стружкообразования на передней поверхности и скоростью резания (рис. 1), и можно принять соотношение для расчета этого угла в виде:

$$\omega = \pi / 4 + r_\omega - \beta, \quad (4)$$

где поправка по предложению Ю.А. Розенберга составляет $r_\omega = \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{tg}(\beta - \gamma)}{\operatorname{tg}(\beta - \gamma) + 2} \right]$.

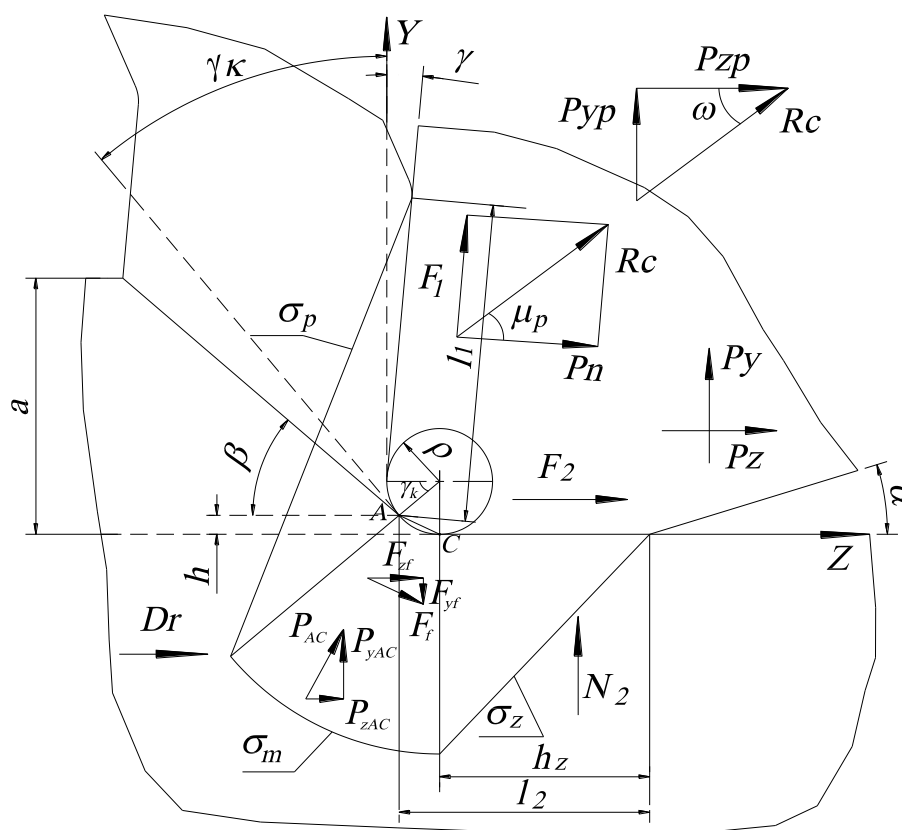


Рис. 1. Схема для расчета параметров стружкообразования и сил резания

Относительный сдвиг связан с углом сдвига и передним углом соотношениями:

$$\varepsilon = \operatorname{ctg}(\beta) + \operatorname{tg}(\beta - \gamma) \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\beta - \gamma) \sin(\beta)}, \quad (5)$$

а скорость сдвига будет равна

$$v_{\tau} = v \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)}. \quad (6)$$

Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$, с^{-1} связана со скоростью сдвига и зависит от толщины зоны сдвига

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_{\tau} 10^3}{\Delta_x 60}, \quad (7)$$

где Δ_x - толщина зоны сдвига, мм.

Для расчетов можно ориентировочно принять толщину зоны сдвига, равную половине толщины срезаемого слоя, т.е. $\Delta_x \approx 0,5a$.

2. Расчет сил резания

Сила стружкообразования есть результирующая сила со стороны передней поверхности, действующая под углом ω к скорости резания (в направлении оси Z, рис. 1):

$$R_c = \tau_p ab / (\sin\beta \cos(\beta + \omega)) \quad (8)$$

Раскладывая силу стружкообразования по соответствующим направлениям, определены составляющие и параметры:

- нормальная и касательная составляющие силы стружкообразования на передней поверхности

$$P_n = R_c \cos(\omega + \gamma); \quad F_1 = R_c \sin(\omega + \gamma);$$

- коэффициент трения на передней поверхности $\mu_p = F_1 / P_n$;

- составляющие силы стружкообразования тангенциальная и радиальная (по направлению осей Z, Y)

$$P_{zp} = R_c \cos(\omega); \quad P_{yp} = R_c \sin(\omega); \quad (9)$$

- максимальное нормальное напряжение на режущей кромке

$$\sigma_m = P_n(n+1) / (l_1 b);$$

- длина контакта стружки по передней поверхности

$$l_1 = 2a / \sin(\beta).$$

Распределение нормальных контактных давлений на передней поверхности задано выражением

$$\sigma_p = \sigma_m (1 - m)^n, \quad m = x_p / l_1, \quad (10)$$

где σ_m – максимальное значение контактного давления на режущей кромке; m – относительное расстояние от режущей кромки; n – показатель степени, определяющий форму эпюры нормального контактного давления:

$$n = 2 \left\{ \frac{l_1}{a K_L [\mu_p + \operatorname{tg}(\beta - \gamma)]} - 1 \right\}, \quad (11)$$

где коэффициент укорочения стружки по (2), угол сдвига по (3).

Тогда среднее значение нормального контактного давления на передней поверхности равно $\sigma_{psr} = \sigma_m / (n+1)$.

Средние значения нормального и касательного контактного давления на задней поверхности лезвия составляют:

- для неизношенного резца ($h_z = 0$) $q_z = \sigma_m$; $\tau_z = \tau_p$;

- для изношенного резца величина износа обозначена как h_z , полная длина контакта по задней поверхности составляет $l_2 = r \cos(\gamma_k) + h_z$, средние контактные давления - нормальное $q_z = \sigma_m / (n_1 + 1)$; касательное $\tau_z = q_z f_{tr}$.

Показатель степени в эюре нормального контактного давления на задней поверхности принят равным единице, т.е. $n_1 = 1$, а коэффициент трения принят равным постоянно-му значению - $f_{tr} = 0,32$.

Силы нормальная и тангенциальная для участка износа по задней поверхности составляют:

$$N_2 = q_z h_z b = \frac{\sigma_m h_z b}{n_1 + 1}; \quad F_2 = N_2 f_{tr}. \quad (12)$$

Длина дуги контакта по участку округления кромки $\check{AC}$ зависит от радиуса округления, который для твердосплавного резца принят равным $\rho = 0,027$ мм.

Параметры для участка округления режущей кромки составляют:

- критический передний угол $\gamma_k = -62^\circ$, который определяет граничную точку А, разделяющую переднюю и заднюю поверхности;

- толщина подминаемого слоя $h = \rho(1 - \sin(|\gamma_k|))$;

- дуга контакта $\check{AC} = \rho(\pi/2 - |\gamma_k|)$;

- нормальная сила $P_{AC} = \sigma_m \cdot \check{AC} \cdot b$; касательная сила $F_f = P_{AC} f_{tr}$;

- составляющие силы тангенциальные и нормальные на участке округления кромки

$$P_{zAC} = P_{AC} \sin(\pi/4 - |\gamma_k|/2); \quad F_{zf} = F_f / \cos(\pi/4 - |\gamma_k|/2); \quad (13)$$

$$P_{yAC} = P_{AC} \cos(\pi/4 - |\gamma_k|/2); \quad F_{yf} = F_f / \sin(\pi/4 - |\gamma_k|/2).$$

Тогда суммарные составляющие силы резания тангенциальная и нормальная учитывают вклад передней поверхности (9), участка округления кромки (13) и задней поверхности (12):

$$P_z = P_{zp} + P_{zAC} + F_{zf} + F_2; \quad (14)$$

$$P_y = P_{yp} + P_{yAC} - F_{yf} + N_2. \quad (15)$$

3. Исходные данные и условия для расчета

Необходимые исходные данные для расчета по выше приведенным формулам содержат механические характеристики инструментальных твердых сплавов и обрабатываемых материалов, и являются справочными. В таблицах 1, 2 приведены характеристики для отечественных марок твердых сплавов и распространенных пластичных обрабатываемых материалов – алюминиевых сплавов, углеродистых сталей, легированных и высоколегированных сталей:

- модуль Юнга и коэффициент Пуассона E_2, μ_2 твердых сплавов и обрабатываемых материалов E_1, μ_1 для расчета угла сдвига (1);

- предел прочности при растяжении σ_b и коэффициент k_m для расчета условного касательного напряжения в плоскости сдвига τ_p .

Приведенные конструкционные материалы относятся к различным группам по обрабатываемости резанием. Для сравнения в таблице 3 приведены усредненные значения скорости резания, рекомендованные для обработки соответствующих материалов. Можно также принять ширину срезаемого слоя в пределах $b = 1 \div 4$ мм, величину износа по задней поверхности $h_z = 0,1 \div 0,8$ мм, задний угол инструмента $\alpha = 7^\circ$, передний угол $\gamma = 15^\circ$.

Таблица 1 Механические характеристики твердых сплавов

Марка твердого сплава	Модуль Юнга E_2 , ГПа	Коэффициент Пуассона μ_2 □
T15K6	525	0,29
T5K10	500	0,29
BK8	610	0,29
BK6M	640	0,29

Таблица 2 Механические характеристики обрабатываемых материалов

Марка обрабатываемого материала	Группа	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %	НВ, МПа	E_1 , ГПа	μ_1	k_m
Д16	Алюминиевый сплав	400	290	9	1050	72	0,33	0,95
АМг6	Алюминиевый сплав	315	130	15	650	71	0,33	0,95
20	Углеродистая сталь	490	294	7	1471	212	0,27	0,925
45	Углеродистая сталь	600	398	16	1739	200	0,27	0,925
60	Углеродистая сталь	680	483	12	1971	204	0,27	0,925
12ХН3А	Легированная сталь	750	558	24	2174	200	0,27	0,8
30Г	Легированная сталь	540	334	18	1565	204	0,27	0,925
40Х	Легированная сталь	770	579	18	2232	214	0,27	0,8
30ХМА	Легированная сталь	930	749	12	2696	208	0,27	0,97
20Х3МВФ	Теплостойкая сталь	880	696	12	2551	207	0,27	0,97
12Х13	Коррозионностойкая хромистая сталь	620	420	20	1797	217	0,27	0,97
14Х17Н2	Коррозионностойкая хромистая сталь	1080	835	10	3130	197	0,27	0,97
12Х18Н10Т	Коррозионностойкая хромоникелевая сталь	510	196	40	1478	198	0,27	1,3
45Х14Н14В2М	Коррозионностойкая жаростойкая жаропрочная хромоникельвольфрамовая сталь	710	315	20	2058	208	0,27	1,3

Таблица 3 Рекомендуемые значения скорости резания

Марка обрабатываемого материала	Марка твердого сплава	Скорость резания v , м/мин
Д16	T15K6	350
АМг6	T15K6	400
20	T15K6	240
45	T15K6	150
60	T5K10	150
12ХН3А	T15K6	180
30Г	T15K6	220
40Х	T5K10	200
30ХМА	T5K10	80
20Х3МВФ	T15K6	80
12Х13	BK6M	120
12Х18Н10Т	T15K6	120
14Х17Н2	BK6M	40
45Х14Н14В2М	BK8	40

4. Анализ и пример результатов расчета

Последовательность формул для расчета (1) – (15) реализована в виде алгоритма и расчетной программы Cutting_Force.

Для анализа результатов приведены графики соответствующих функций для аргумента – толщина срезаемого слоя для условий обработки конструкционной углеродистой стали марки 45 резцом из твердого сплава марки T15K6, $b = 3$ мм, $h_z = 0,5$ мм: угол сдвига (рис. 2); коэффициент укорочения, относительный сдвиг (рис. 3); коэффициент трения на передней поверхности (рис. 4); силы на задней поверхности (рис. 5); суммарные составляющие (рис. 6).

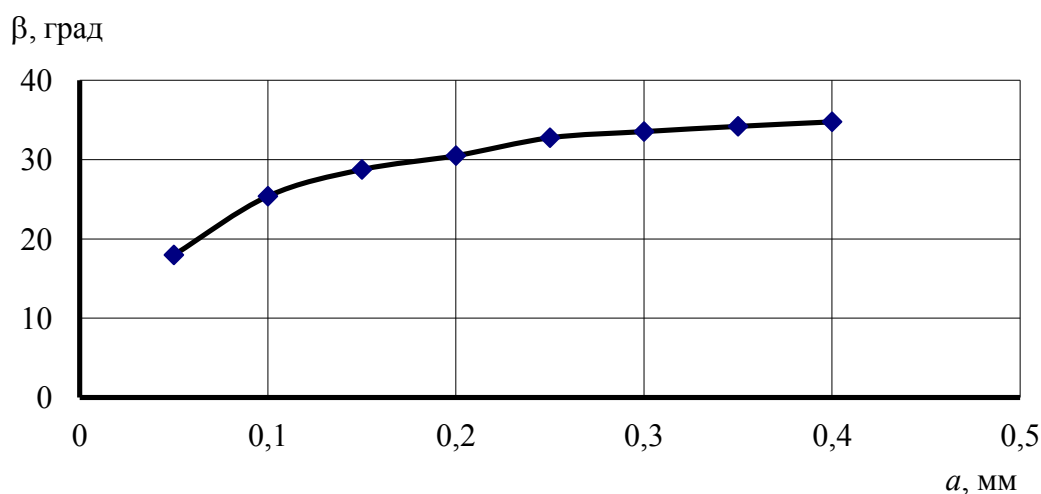


Рис. 2. Влияние толщины среза на угол сдвига

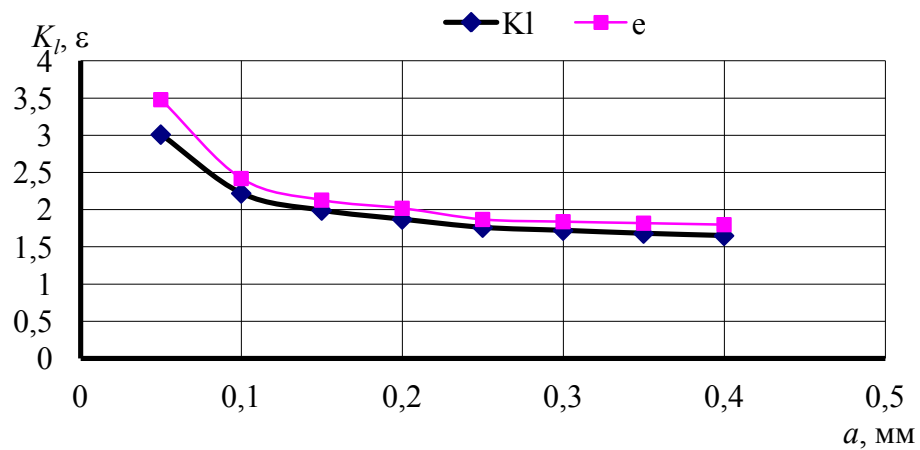


Рис. 3. Влияние толщины среза на коэффициент укорочения стружки и относительный сдвиг

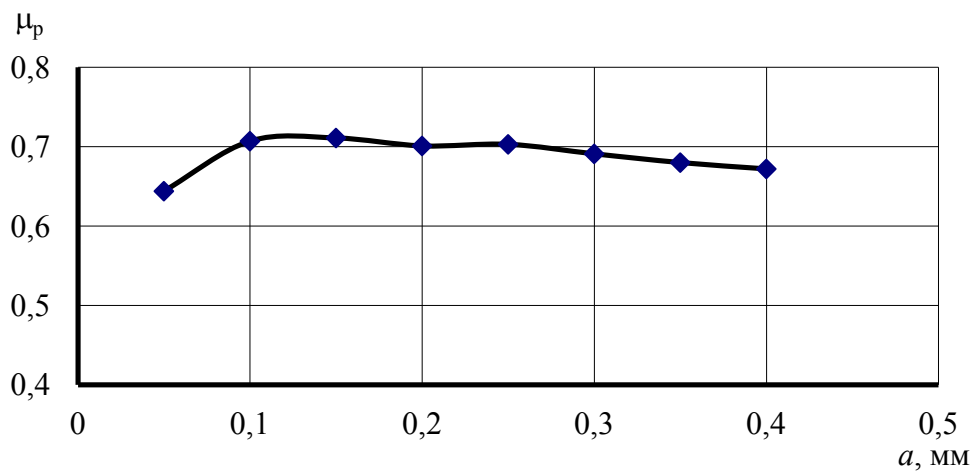


Рис. 4. Влияние толщины среза на коэффициент трения на передней поверхности

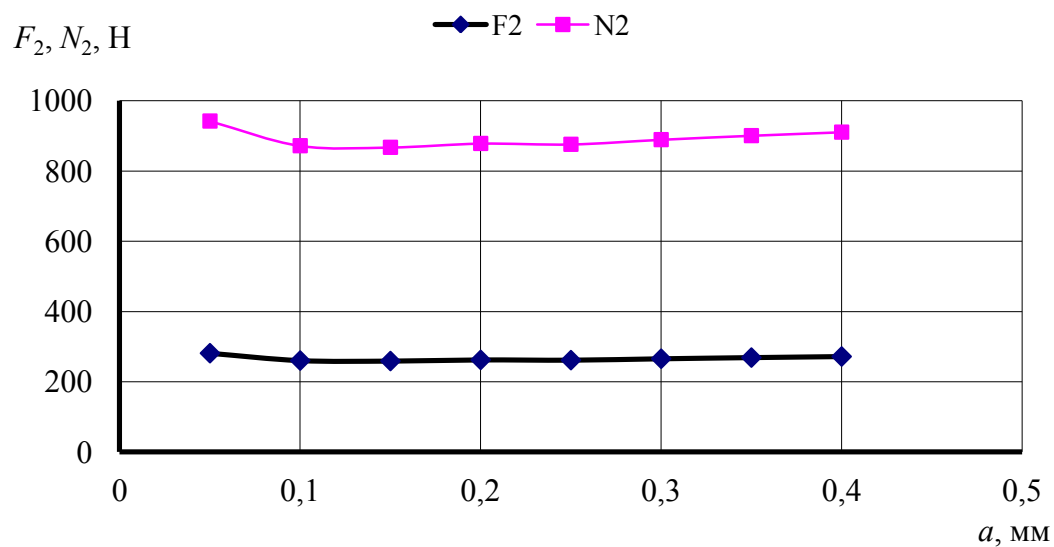


Рис. 5. Влияние толщины среза на силы на задней поверхности

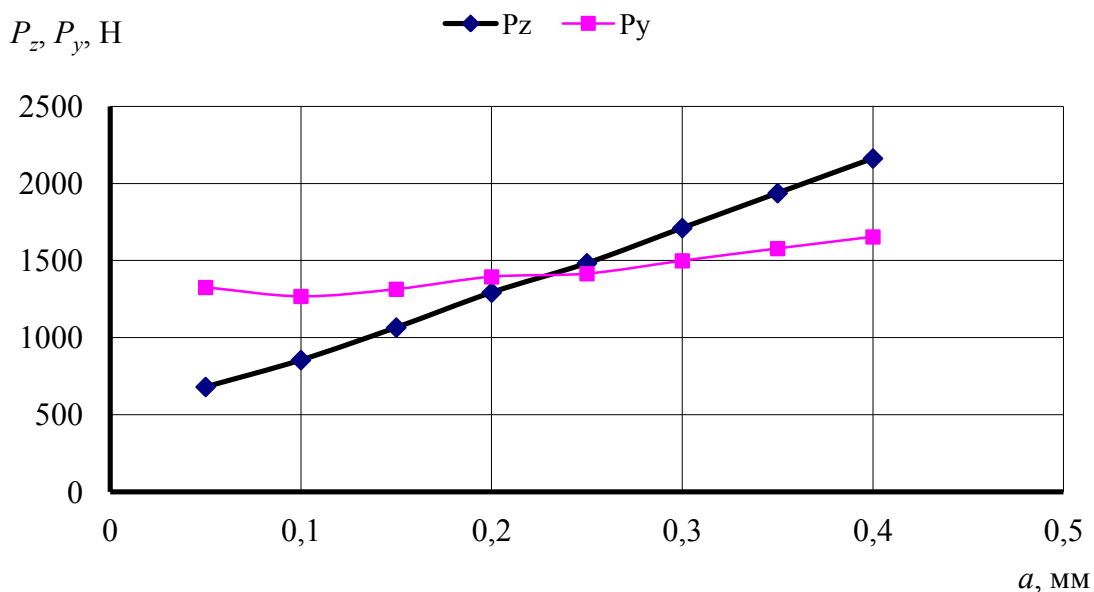


Рис. 6. Влияние толщины среза на суммарные составляющие силы резания

Заключение

Полученные расчетные зависимости качественно и количественно подтверждают основные теоретические положения резания металлов:

- угол сдвига повышается, а коэффициент укорочения стружки и относительный сдвиг снижаются с увеличением толщины среза, что указывает на уменьшение степени пластической деформации;
- коэффициент трения на передней поверхности изменяется в пределах $0,64 \div 0,71$ (для выбранного примера расчета) и зависит от условий резания;
- силы резания на задней поверхности не зависят от толщины срезаемого слоя;
- суммарные составляющие силы увеличиваются с увеличением толщины, тангенциальная составляющая интенсивнее, чем радиальная;
- для малых толщин радиальная составляющая превосходит тангенциальную составляющую силы резания;
- расчетные значения сил резания будут использованы для анализа теплофизических параметров резания;
- радиальная составляющая силы резания определяет упругую деформацию технологической системы, значительно увеличивается с увеличением износа инструмента и влияет на погрешность обработки;
- тангенциальная составляющая силы определяет ограничение по мощности резания.

Список литературы

1. Розенберг Ю.А. Резание материалов: учебник. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2007. 294 с.

2. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: учебник. М.: Высш. школа, 2009. 534 с.
3. Klocke F. Manufacturing processes. 1: Cutting. B.; Heidelberg: Springer, 2011. 504 p.
DOI: [10.1007/978-3-642-11979-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8)
4. Trent E.M., Wright P.K. Metal cutting. 4th ed. Boston: Butterworth–Heinemann, 2000. 446 p.
5. Stahl J.-E., Andersson M., Bushlya V., Jinming Zhou, Andersson C., Hogrelus B., Gunnarsson S., Schultheiss F. Metal cutting: Theories and models. Lund: Lund Univ. Press, 2012. 580 p.
6. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
7. Грубый С.В. Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными резцами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 107 с.
8. Petrushin S.I., Proskokov A.V. Theory of constrained cutting: Chip formation with a developed plastic-deformation zone // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. No. 1. Pp. 45–50. DOI: [10.3103/S1068798X10010119](https://doi.org/10.3103/S1068798X10010119)
9. Ярославцев В.М. Механика процесса резания пластически деформированных металлов с неоднородными свойствами по толщине срезаемого слоя // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электрон. журн. 2011. № 8. DOI: [10.7463/0811.0195350](https://doi.org/10.7463/0811.0195350)
10. Грубый С.В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
11. Грубый С.В. Расчетные параметры стружкообразования при несвободном косоугольном резании пластичных материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 1. С. 4-15. DOI: [10.18698/0536-1044-2017-1-4-15](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-1-4-15)

Calculating Parameters of Chip Formation and Cutting Forces of Plastic Materials

S.V. Grubyi^{1,*}

^{*}grusv@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: chip formation, shear angle, velocity factor of the chip, relative shift, power of chip formation, cutting force

In addition to the kinematics and geometric parameters of the tool, parameters of chip formation and cutting forces lay the groundwork for theoretical analysis of various types of machining.

The objective of research activities is to develop a calculation technique to evaluate parameters of chip formation and cutting forces when machining such plastic materials as structural carbon and alloy steels, and aluminum alloys. The subject of research activities is directly a cutting process, algorithms and calculation methods in the field under consideration. A theoretical (calculated) method to analyse parameters was used. The results of qualitative and quantitative calculations were compared with the published experimental data.

As to the chip formation and cutting forces, a model with a single shear plane is analyzed, which allows a quantitative evaluation of the parameters and of the process factors. Modern domestic and foreign authors' publications of cutting metals use this model on the reasonable grounds. The novelty of the proposed technique is that calculation of parameters and cutting forces does not require experimental research activities and is based on using the known mechanical characteristics of machined and tool materials. The calculation results are parameters, namely the shear angle, velocity factor of the chip, relative shift, friction coefficient at the front surface, cutting forces, etc. Calculation of these parameters will allow us to pass on to the thermo-physical problems, analysis of tool wear and durability, accuracy, quality and performance rate.

The sequence of calculations is arranged in the developed user program in an algorithmic programming language with results in graphical or tabulated view. The calculation technique is a structural component of the cutting theory and is to be used in conducting research activities and engineering calculations in this subject area.

References

1. Rozenberg Yu.A. *Rezanie materialov* [Cutting of materials]: a textbook. Kurgan: Kurgan State Univ. Publ., 2007. 294 p. (in Russian).
2. Vereschaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov* [Cutting materials]: a textbook. Moscow: Vysshaia shkola Publ., 2009. 535 p. (in Russian).
3. Klocke F. Manufacturing processes. 1: Cutting. B.; Heidelberg: Springer, 2011. 504 p. DOI: [10.1007/978-3-642-11979-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8)
4. Trent E.M., Wright P.K. Metal cutting. 4th ed. Boston: Butterworth–Heinemann, 2000. 446 p.
5. Stahl J.-E., Andersson M., Bushlya V., Jinming Zhou, Andersson C., Hogrelus B., Gunnarsson S., Schultheiss F. Metal cutting: Theories and models. Lund: Lund Univ. Press, 2012. 580 p.
6. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiia rezaniia materialov* [Physics and optimization of cutting of materials]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p. (in Russian).
7. Grubiy S.V. *Modelirovanie protsessa rezaniia tverdosplavnymi i almaznymi reztsami* [Simulation of the process of cutting carbide and diamond tools]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2010. 107 p. (in Russian).
8. Petrushin S.I., Proskokov A.V. Theory of constrained cutting: Chip formation with a developed plastic-deformation zone. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 45–50. DOI: [10.3103/S1068798X10010119](https://doi.org/10.3103/S1068798X10010119)
9. Yaroslavtsev V.M. Mechanics of cutting processes of plastically deformed metals with non-uniform properties of cutting layer. *Nauka i obrazovani. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 8. DOI: [10.7463/0811.0195350](https://doi.org/10.7463/0811.0195350) (in Russian)
10. Grubiy S.V. *Optimizatsiia protsessa mekhanicheskoy obrabotki i upravlenie rezhimnymi parametrami* [Optimizing the machining process and the management regime parameters]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2014. 149 p. (in Russian).
11. Grubiy S.V. Calculated parameters of chip formation for restricted oblique cutting of plastic materials. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* [Proc. of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2017, no. 1, pp. 4-15. DOI: [10.18698/0536-1044-2017-1-4-15](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-1-4-15) (in Russian)