

Расчет и конструирование машин

УДК 621.941.1

Расчет сил резания при обработке пластичных материалов в широком диапазоне толщин срезаемого слоя

С.В. Грубый

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Calculation of the Cutting Forces When Processing Plastic Materials with a Wide Range of Thicknesses of the Cutting Layer

S.V. Grubyu

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: grusv@yandex.ru

i К теоретическим основам процесса резания можно отнести закономерности стружкообразования, контактные взаимодействия на поверхностях рабочего инструмента и расчет сил резания. Разработка расчетных моделей сил резания является актуальной, так как позволяет исключить трудоемкие экспериментальные исследования и оценить показатели точности и качества обработки. С учетом того, что для различных режущих инструментов используют значения подачи или толщины срезаемого слоя от сотых до десятых долей миллиметра поставлена и решена научно-техническая задача теоретического анализа сил резания в этом диапазоне. Предложена методика расчета параметров стружкообразования и сил резания при обработке пластичных материалов. Последовательность вычислений организована в созданной пользовательской программе. Методика может быть применена при проведении научных исследований и инженерных расчетов в предметной области механической обработки резанием для различных видов режущих инструментов.

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

i Chip formation patterns, contact interactions on the tools surfaces and cutting force calculations constitute the theoretical foundation of the cutting process. It is important to develop models for calculating cutting forces as this eliminates labour-intensive experimental studies and makes it possible to evaluate accuracy and quality indicators of the cutting process. Considering that for various cutting tools the values of feed and cutting layer thickness range from hundredth to tenth of a millimetre, a research problem of performing a theoretical analysis of the cutting forces in this range is formulated and solved. A method of calculating chip formation parameters and cutting forces when processing plastic materials is proposed. Computing sequencing is organized in the developed user program. The method can be used for conducting research and performing engineering

calculations in the subject area of mechanical processing by cutting for various types of cutting tools.

Keywords: chip formation parameters, shear angle, chip reduction coefficient, relative shear, cutting force, roughness parameters

Основы современного расчета параметров стружкообразования и механики резания отражены в ряде учебников, монографий и научных статей. Например, в обобщенном виде со ссылками на литературные источники расчетные методики приведены в отечественном учебнике [1]. Аналогичный подход использован зарубежными авторами, в частности в работах [2, 3], где описана модель с единственной плоскостью сдвига, позволяющая получить численные оценки параметров стружкообразования и сил резания. В статье [4] рассмотрены количественные соотношения для резания с развитой зоной пластической деформации, выделенной соответствующими линиями скольжения. Современный научный уровень исследований дает возможность объяснить и представить квантово-механическое моделирование деформации и разрушения срезаемого слоя при резании [5].

Обобщение данных предшествующих работ, основанных на «классической» модели стружкообразования с единственной плоскостью (поверхностью) сдвига, позволило автору получить количественные соотношения параметров стружкообразования и сил резания, в том числе для условий несвободного косоугольного резания [6, 7]. Вместе с тем эти соотношения имеют ограничения, так как позволяют рассчитывать

параметры стружкообразования для толщины срезаемого слоя, равной или большей, чем радиус округления режущей кромки лезвия инструмента.

В некоторых научных трудах рассмотрены вопросы стружкообразования с учетом влияния радиуса округления кромки [8–10]. В то же время основой указанных количественных соотношений являются экспериментальные исследования для нахождения ряда определяющих параметров.

Цель работы — разработка методики расчета параметров стружкообразования и сил резания в широком диапазоне толщин срезаемого слоя, не требующей проведения экспериментальных исследований.

Входными переменными служат геометрические параметры инструмента, скорость резания, толщина и ширина срезаемого слоя, известные механические характеристики обрабатываемого и инструментального материалов. Выходными параметрами являются: угол сдвига, коэффициент укорочения стружки, относительный сдвиг, коэффициент трения на передней и задней поверхностях инструмента, силы резания и составляющие шероховатости обработанной поверхности.

Общая схема геометрических параметров и сил на контактных поверхностях лезвия инструмента приведена на рис. 1. Здесь использована зависимость для расчета угла сдвига, заимствованная из работ автора [6, 7]:

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

где k_1 — коэффициент, отражающий влияние скорости резания; η_0 — упругая постоянная двух соприкасающихся тел (стружка–инструмент); E_1 — модуль упругости обрабатываемого материала; b и a — ширина и толщина срезаемого слоя; γ — среднее значение переднего угла инструмента.

Тогда коэффициент укорочения стружки

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

где k_2 — коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемых сталей.

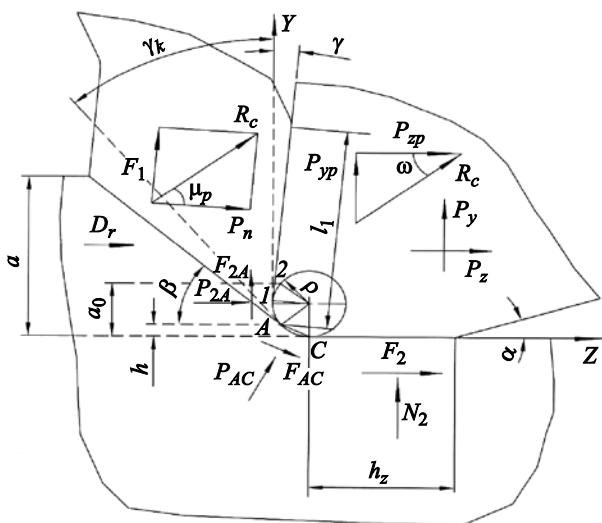


Рис. 1. Схема геометрических параметров и сил резания на контактных поверхностях лезвия инструмента (D_r — главное движение резания)

В окончательном виде выражение для расчета среднего угла сдвига, откорректированное с учетом влияния скорости резания и свойств обрабатываемых сталей, записывается следующим образом:

$$\beta = \text{arccctg} \frac{K_L - \sin \gamma}{\cos \gamma}, \quad (3)$$

где коэффициент K_L определяют по выражению (2).

Для вычисления угла действия ω — угла между результирующей силой стружкообразования R_c на передней поверхности и скоростью резания (см. рис. 1) — можно использовать соотношение

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

где r_ω — поправка, принятая по предложению Ю.А. Розенберга [1].

Относительный сдвиг ε связан с углом сдвига и передним углом следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma) \sin \beta}, \quad (4)$$

где угол сдвига рассчитывают по формулам (1)–(3).

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

$$R_c = \tau_p ab / [\sin \beta \cos(\beta + \omega)],$$

где τ_p — напряжение в плоскости сдвига.

Составляющие силы стружкообразования на передней поверхности определяются следующими выражениями:

- нормальная и касательная

$$P_n = R_c \cos(\omega + \gamma) \text{ и } F_1 = R_c \sin(\omega + \gamma);$$

- тангенциальная и радиальная (по направлению осей Z и Y)

$$P_{zp} = R_c \cos \omega \text{ и } P_{yp} = R_c \sin \omega;$$

Параметры на передней поверхности:

- коэффициент трения

$$\mu_p = F_1 / P_n;$$

- длина контакта стружки и максимальное нормальное напряжение на режущей кромке

$$l_1 = 2a / \sin \beta; \quad \sigma_m = P_n(n + 1) / l_1 b,$$

где n — показатель степени, определяющий форму эпюры нормального контактного давления.

Согласно экспериментальным данным, обобщенным в работе [1], a_0 — толщина срезаемого слоя до точки 2 — является граничной толщиной, до которой степень деформации стружки зависит от нее: $a_0 = 1,74\rho$ (ρ — радиус округления кромки).

Точка A на рис. 1 разделяет переднюю и заднюю поверхности лезвия. Силы, возникающие на длине $2A$:

- нормальная $P_{2A} = \sigma_m l_{2A} b$ и ее составляющие P_{z2A}, P_{y2A} по направлению осей Z и Y ;

- тангенциальная $F_{2A} = P_{2A} \mu_p$ и ее составляющие F_{z2A}, F_{y2A} .

Силы на дуге AC задней поверхности:

- нормальная $P_{AC} = \sigma_m AC \cdot b$ и ее составляющие P_{zAC}, P_{yAC} ;

- тангенциальная $F_{AC} = P_{AC} f_{tr}$ и ее составляющие F_{zAC}, F_{yAC} .

Средние значения нормального q_z и касательного τ_z контактных давлений на задней поверхности лезвия правее точки C определяются следующими соотношениями:

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

- для изношенного резца ($h_z > 0$) $q_z = \sigma_m / (n_1 + 1)$, $\tau_z = q_z f_{tr}$ (f_{tr} — коэффициент трения), показатель степени в эпюре нормального контактного давления $n_1 = 1$.

Молекулярная составляющая коэффициента трения на задней поверхности лезвия представлена аппроксимирующими выражениями в зависимости от температуры контакта, в частности, в работе автора [6].

Нормальная N_2 и тангенциальная F_2 силы для участка износа по задней поверхности имеют вид

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

Параметры для участка округления режущей кромки:

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

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

С учетом рассмотренных параметров суммарные составляющие силы резания в направлении осей Z и Y определяются следующими выражениями:

- тангенциальная

$$P_z = P_{zp} + P_{z2A} + F_{z2A} + P_{zAC} + F_{zAC} + F_2; \quad (5)$$

- радиальная

$$P_y = P_{yp} + P_{y2A} + F_{y2A} + P_{yAC} - F_{yAC} + N_2. \quad (6)$$

Вместе с тем Ю.А. Розенберг и С.И. Тахман по результатам обработки большого количества экспериментальных данных предложили рассчитывать относительный сдвиг, соответствующий граничной толщине срезаемого слоя a_0 , по формуле

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_\gamma(1 - K_\gamma\gamma),$$

где для стали $\varepsilon_\gamma = 2,7$; $K_\gamma = 0,016$; передний угол приведен в градусах.

Соответствующий угол сдвига

$$\omega_0 = \arctg(0,18\varepsilon_0).$$

Тогда в общем виде условия для расчета относительного сдвига принимают вид

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0, \quad a \geq a_0; \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 \left(1 + \frac{a_0 - a}{\rho} \right), \quad a < a_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Тангенциальная составляющая силы резания

$$P_z = P_{zp} + P_{zAC} + F_2. \quad (8)$$

Здесь слагаемые на передней поверхности P_{zp} , на радиусной части задней поверхности P_{zAC} и на площадке износа F_2 рассчитываются по выражениям

$$\begin{aligned} P_{zp} &= C_{pp}ab; \quad C_{pp} = \tau_p(\varepsilon_0 + 1); \\ P_{zAC} &= C_p K_p b; \quad C_p = 1,5\tau_p \varepsilon_0 \rho; \\ K_p &= \sqrt{a/a_0}, \quad a < a_0; \quad K_p = 1, \quad a \geq a_0; \\ F_2 &= C_h b; \quad C_h = \sigma_{02} h_z f_{tr}, \end{aligned}$$

где τ_p — напряжение в плоскости сдвига; σ_{02} — предел текучести обрабатываемого материала.

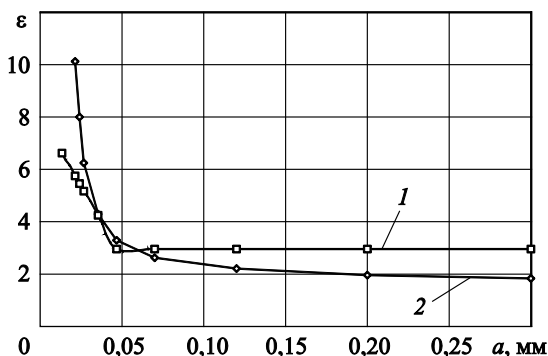


Рис. 2. Влияние толщины срезаемого слоя a на относительный сдвиг ε , рассчитанный по выражениям:
1 — (4); 2 — (7)

Радиальная составляющая силы резания

$$P_y = P_{yp} + P_{yAC} + N_2, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} P_{yp} &= U_{pp}ab; \quad U_{pp} = \tau_p(\varepsilon_0 + 1)\text{tg}\omega_0; \\ P_{yAC} &= U_p K_p b; \quad U_p = 1,5\tau_p \rho(3,17\varepsilon_0 + 1)\text{tg}\omega_0; \\ N_2 &= U_h b; \quad U_h = \sigma_{02} h_z. \end{aligned}$$

Таким образом, рассмотрены две системы взаимосвязанных уравнений, позволяющие рассчитать сопутствующие параметры и силы резания для лезвия инструмента с округленной режущей кромкой. Сравнение систем расчета проведено по представленным далее графическим зависимостям.

Влияние толщины срезаемого слоя на относительный сдвиг для режущей кромки с радиусом округления $\rho = 0,027$ мм при обработке стали марки 45 резцом из твердого сплава Т15К6 показано на рис. 2. Кривая 1 построена по выражению (4), а кривая 2 — по формуле (7). Ширина срезаемого слоя b была постоянной и равной 2 мм, скорость резания $v = 300$ м/мин. Выражение (4) дает завышенные значения относительного сдвига для толщин срезаемого слоя $a < 0,03$ мм. По результатам анализа предложено использовать комбинированный вариант: выражение (4) применять для $a > a_0$, а соотношение (7) — для $a \leq a_0$.

Влияние толщины срезаемого слоя на относительный сдвиг при различных значениях переднего угла инструмента ($\gamma = 20, 12, 0$ и -5°) по комбинированному варианту расчета отражено на рис. 3. Следует отметить, что номинальные значения переднего угла были пересчитаны в фактические средние значения, соответствующие заданной толщине срезаемого слоя.

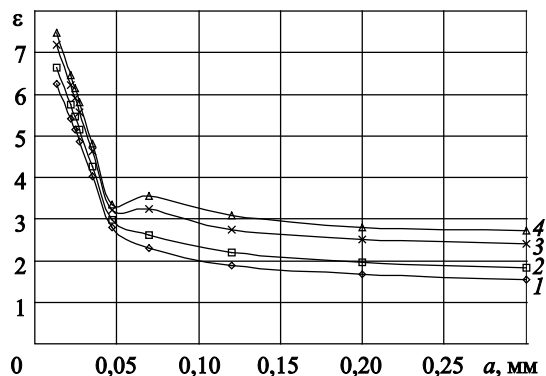


Рис. 3. Влияние толщины срезаемого слоя a на относительный сдвиг ε при различных значениях переднего угла инструмента:
1 — $\gamma = 20^\circ$; 2 — $\gamma = 12^\circ$; 3 — $\gamma = 0^\circ$; 4 — $\gamma = -5^\circ$

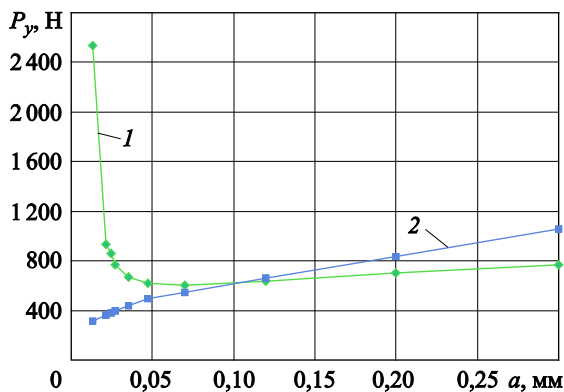


Рис. 4. Влияние толщины срезаемого слоя a на радиальную P_y составляющую силы резания, рассчитанных по выражениям: 1 — (6); 2 — (9)

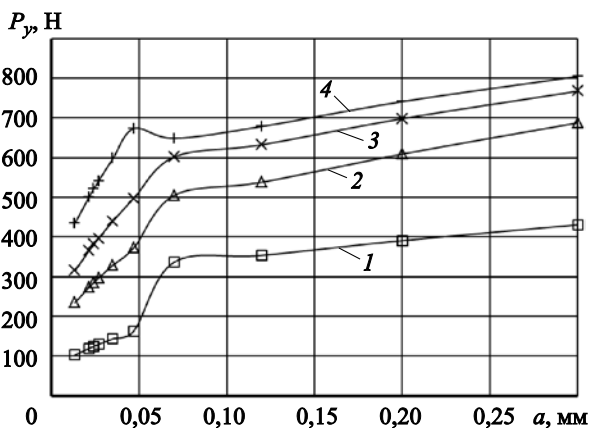


Рис. 5. Влияние толщины срезаемого слоя a на радиальную P_y составляющую силы резания для различных обрабатываемых материалов: 1 — алюминиевый сплав Амгб; 2 — сталь 20; 3 — сталь 45; 4 — сталь 40Х

Влияние толщины срезаемого слоя на радиальную составляющую силы резания для двух вариантов расчета показано на рис. 4, где кривая 1 получена по выражению (6), а кривая 2 — по соотношению (9). Видно, что расчет по выражению (6) дает завышенные результаты при малых толщинах среза. Это объясняется как большими значениями относительного сдвига и коэффициента укорочения стружки, так и существенными отрицательными значениями переднего угла инструмента.

Комбинированный вариант расчета сил резания по выражениям (5), (6) для $a > a_0$ и по соотношениям (8), (9) для $a \leq a_0$ дает результаты, соответствующие экспериментальным данным.

Влияние толщины срезаемого слоя на радиальную составляющую силы резания по комбинированному варианту расчета для различных обрабатываемых материалов (алюминиевого

сплава Амгб, низколегированной марки 40Х и углеродистых марки 20 и 45 сталей) отражено на рис. 5.

Влияние толщины срезаемого слоя на радиальную составляющую силы резания при различных значениях радиуса округления режущей кромки ($\rho = 0,04; 0,027; 0,01; 0,005$ мм) показано на рис. 6. С увеличением радиуса округления кромки силы резания возрастают вследствие повышения относительного сдвига и коэффициента укорочения стружки.

Значения радиальной составляющей силы резания использованы для анализа составляющих шероховатости обработанной поверхности. Для этого расчетные значения радиальной составляющей силы резания (Н) при обработке стали марки 45 резцом из сплава Т15К6 с радиусом округления кромки $\rho = 0,01$ мм аппроксимированы степенной зависимостью

$$P_y = C_{p0} b^{x_p} a^{y_p} / v^{n_p} = 611,5 b^{1,04} a^{0,249} / v^{0,08}, \quad (10)$$

где ширина и толщина срезаемого слоя приведены в мм, скорость резания в м/мин.

По выражению (10) можно перейти к зависимости радиальной составляющей силы резания от режимных переменных — подачи на оборот s (мм/об), глубины t и скорости резания:

$$P_y = C_{p0} (\sin \varphi)^{y_p - x_p} t^{x_p} s^{y_p} / v^{n_p}, \quad (11)$$

где φ — главный угол в плане.

Расчетное значение шероховатости обработанной поверхности включает в себя четыре составляющие: h_1 — кинематическую; h_2 — связанную с колебаниями и движением вершины инструмента по следу от предыдущего прохода с шероховатостью Rz_i ; h_3 — от пластического оттеснения материала вершиной инстру-

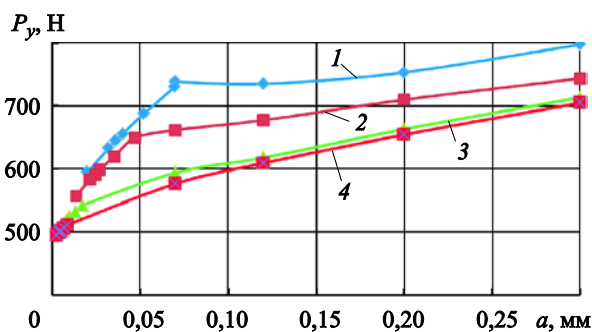


Рис. 6. Влияние толщины срезаемого слоя a на радиальную составляющую P_y силы резания при различных значениях радиуса округления кромки: 1 — $\rho = 0,04$ мм; 2 — $\rho = 0,027$ мм; 3 — $\rho = 0,01$ мм; 4 — $\rho = 0,005$ мм

мента; Rz_b — от копирования шероховатости режущей кромки. Для анализа составляющих шероховатости использованы выражения, приведенные в монографии А.Г. Суслова [11].

Для расчета приняты следующие исходные данные: главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 45^\circ$; радиус вершины $r = 1,2$ мм; радиус округления кромки $\rho = 0,01$ мм; глубина резания $t = 2$ мм; скорость резания $v = 200$ м/мин; исходная шероховатость $Rz_i = 60$ и 10 мкм; шероховатость режущей кромки инструмента $Rz_b = 0,4$ мкм. Для этих условий пластическое оттеснение материала является несущественным, поэтому выражение для расчета параметра шероховатости примет вид

$$Rz = h_1 + h_2 + Rz_b.$$

Здесь

$$h_1 = s^2 / (8r) \cdot 1000; \quad h_2 = \frac{P_y(t) - P_y(t - Rz_i/1000)}{j},$$

j — жесткость технологической системы, Н/мкм.

Радиальная составляющая силы как функция глубины $P_y(t)$ вычислена по выражениям (10), (11).

Влияние подачи на составляющие шероховатости для исходной шероховатости $Rz_i = 60$ мкм показано на рис. 7, где кривая 1 построена для кинематической составляющей h_1 , а кривые 2, 3 и 4 — для составляющей h_2 , рассчитанной соответственно при жесткости $j = 50, 25$ и 10 Н/мкм. Следует отметить, что кинематическая составляющая практически не

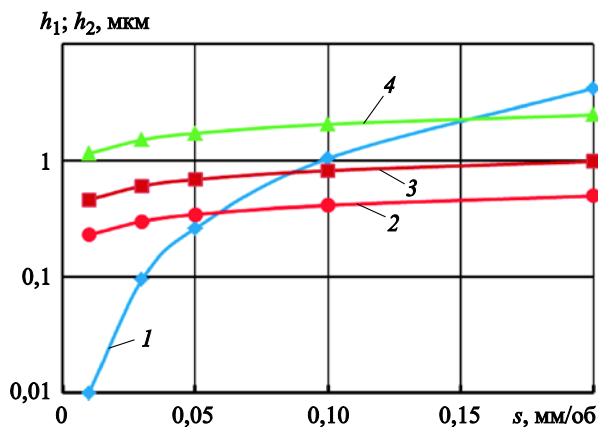


Рис. 7. Влияние толщины срезаемого слоя a на составляющие шероховатости для исходной шероховатости $Rz_i = 60$ мкм: 1 — h_1 ; 2, 3 и 4 — h_2 при жесткости $j = 50, 25$ и 10 Н/мкм соответственно

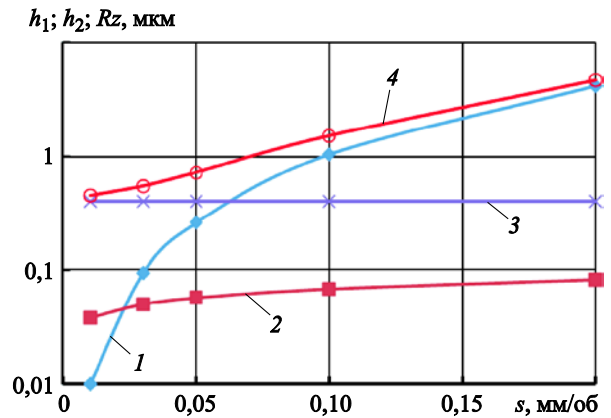


Рис. 8. Влияние подачи s на общую шероховатость обработанной поверхности и ее составляющие для исходной шероховатости $Rz_i = 10$ мкм: 1 — h_1 ; 2 — h_2 при жесткости $j = 50$ Н/мкм; 3 — $Rz_b = 0,4$ мкм; 4 — Rz

оказывает влияния на шероховатость при подаче $s < 0,05$ мм/об. Составляющая от колебаний инструмента уменьшается с увеличением радиальной жесткости j . Таким образом, общая шероховатость обработанной поверхности для заданных условий резания может быть снижена путем уменьшения исходной шероховатости.

Влияние подачи на общую шероховатость и ее составляющие для исходной шероховатости $Rz_i = 10$ мкм отражено на рис. 8. Здесь кривая 1 построена для кинематической составляющей h_1 , кривая 2 — для составляющей h_2 , рассчитанной при жесткости $j = 50$ Н/мкм, кривая 3 — для шероховатости режущей кромки $Rz_b = 0,4$ мкм, кривая 4 — для общей шероховатости Rz .

Для значений подачи, составляющих сотые доли миллиметра на оборот, шероховатость обработанной поверхности определяется шероховатостью режущей кромки инструмента. С увеличением подачи более $0,1$ мм/об шероховатость практически соответствует кинематической составляющей.

Выводы

1. Предложена обобщенная методика для расчета параметров стружкообразования и сил резания в диапазоне толщин срезаемого слоя от сотых до десятых долей миллиметра.

2. Эта методика применима при обработке пластичных материалов и может быть распространена на различные виды инструментов.

3. Расчетные значения радиальной составляющей силы резания использованы для анали-

за составляющих и общей шероховатости обработанной поверхности при точении.

4. Обосновано, что для заданных условий обработки снижение шероховатости поверхно-

сти обеспечивается уменьшением исходной шероховатости и шероховатости режущей кромки инструмента, а также увеличением жесткости технологической системы.

Литература

- [1] Розенберг Ю.А. *Резание материалов*. Курган, Зауралье, 2007. 294 с.
- [2] Toenshoff H.K., Denkena B. *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013. 399 p.
- [3] Ravi Shankar M., Verma R., Rao B.C., Chandrasekar S., Compton W.D., King A.H., Trumble K.P. Severe Plastic Deformation of Difficult-to-Deform Materials at Near-Ambient Temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2007, vol. 38A, is. 9, pp. 1899–1905.
- [4] 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.
- [5] Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М. Квантово-механическое моделирование деформации и разрушения срезаемого слоя при резании. *Вестник машиностроения*, 2016, № 4, с. 65–71.
- [6] Грубый С.В. *Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
- [7] Грубый С.В. Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2017, № 1, с. 25–37, doi: 10.24108/aplts.0117.0000058.
- [8] Aramcharoen A., Mativenga P.T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, 2009, no. 33, pp. 402–407.
- [9] Son S.M., Lim H.S., Ahn J.H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, no. 45, pp. 529–535.
- [10] Трилисский В.О., Большаков Г.С. Расчет сил резания для инструмента со скругленной режущей кромкой. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 2007, no. 3, с. 116–122.
- [11] Суслов А.Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2000. 320 с.

References

- [1] Rozenberg Iu.A. *Rezanie materialov* [Cutting of materials]. Kurgan, Zaural'e publ., 2007. 294 p.
- [2] Toenshoff H.K., Denkena B. *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013. 399 p.
- [3] Ravi Shankar M., Verma R., Rao B.C., Chandrasekar S., Compton W.D., King A.H., Trumble K.P. Severe Plastic Deformation of Difficult-to-Deform Materials at Near-Ambient Temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2007, vol. 38A, is. 9, pp. 1899–1905.
- [4] 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.
- [5] Kabalدين Iu.G., Kuz'mishina A.M. Kvantovo-mekhanicheskoe modelirovanie deformatsii i razrusheniia srezaemogo sloia pri rezanii [Quantum-mechanical modeling of deformation and failure of sheared-off layer at cutting]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2016, no. 4, pp. 65–71.
- [6] Grubyi S.V. *Optimizatsiia protsessa mekhanicheskoi obrabotki i upravlenie rezhimnymi parametrami* [Optimization of the machining process and control regime parameters]. Moscow, Bauman Press, 2014. 149 p.
- [7] Grubyi S.V. Raschet parametrov struzhkoobrazovaniia i sil rezaniia plastichnykh materialov [Calculating Parameters of Chip Formation and Cutting Forces of Plastic Materials]. *Ma-*

- shiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiia* [Machines and Plants: Design and Exploiting]. 2017, no. 1, pp. 25–37, doi: 10.24108/aplts.0117.0000058.
- [8] Aramcharoen A., Mativenga P.T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, 2009, no. 33, pp. 402–407.
- [9] Son S.M., Lim H.S., Ahn J.H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, no. 45, pp. 529–535.
- [10] Trilisskii V.O., Bol'shakov G.S. Raschet sil rezaniia dlia instrumenta so skruglennoi rezhushchei kromkoi [Calculation of cutting resistance for an instrument with a rounded cutting edge]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Technical sciences]. 2007, no. 3, с. 116–122.
- [11] Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloia detalei mashin* [The quality of surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000. 320 p.

Статья поступила в редакцию 10.10.2017

Информация об авторе

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

Information about the author

GRUBYI Sergey Vitalievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor. Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv@yandex.ru).