

Ссылка на статью

// Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация.

МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Электрон. журн. 2017. № 03. С. 55–69.

DOI: [10.7463/aplts.0317.0000068](https://doi.org/10.7463/aplts.0317.0000068)

Представлена в редакцию: 07.05.2017

Исправлена: 21.05.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.941.1

Расчет параметров теплофизики резания пластичных материалов

Грубый С.В.^{1,*}

[*grusv@yandex.ru](mailto:grusv@yandex.ru)

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

Предметом исследования являются параметры теплофизики и температура резания при обработке пластичных материалов твердосплавным инструментом. Целью исследований является разработка методики для расчета этих параметров.

Расчет основан на использовании известных механических и теплофизических характеристик обрабатываемого и инструментального материалов. Результатами расчетов являются параметры: интенсивности тепловых потоков в условной плоскости сдвига, на контактных поверхностях инструмента, температуры этих поверхностей, усредненная температура резания – в зависимости от скорости резания, толщины среза, величины износа инструмента.

Расчетная методика предназначена для использования при проведении научных исследований и инженерных расчетов в предметной области механической обработки резанием.

Ключевые слова: тепловая мощность; интенсивность теплового потока; температура; толщина среза; скорость резания; износ инструмента

Введение

Для практической реализации технологических процессов механической обработки в ряде случаев необходимо знать температуру резания. Например, температура резания влияет на тепловое удлинение инструмента, что нужно учитывать при расчете погрешностей чистовой обработки. Существенное влияние температура резания оказывает на скорость и интенсивность изнашивания инструмента при обработке так называемых «труднообрабатываемых» материалов. Автором разработана расчетная методика, с помощью которой можно определить скорость изнашивания инструмента с учетом разупрочнения обрабатываемого и инструментального материалов от температуры резания с последующим расчетом величины износа и стойкости инструмента [1].

Методы экспериментального определения температур резания с использованием искусственных и естественных термопар достаточно подробно изложены в литературе, в том числе и учебной, но эти методы применимы в лабораторных условиях и

характеризуются значительной трудоемкостью [2-4]. Поэтому экспериментальные методы измерения температур можно рассматривать как проверочные и использовать их для подтверждения расчетных зависимостей.

Аналитически найти решения нелинейных уравнений термодинамики, описывающих тепловые процессы на передней и задней поверхностях инструмента, затруднительно [5]. Поэтому для расчета температур используют различные упрощенные методы и модели, например, метод конечных разностей (элементов) [6], и метод подобия при резании С.С. Силина [7]. Вместе с тем широкое применение находит так называемый метод источников и стоков теплоты, который предложил использовать в расчетах по теплофизике резания А.Н. Резников [8, 9].

Специально проведенное сравнение двух последних методов показало, что при расчетах по критериальным уравнениям С.С. Силина нужно учитывать некоторые ограничения, а расчетная методика А.Н. Резникова показывает хорошее совпадение с результатами экспериментов для пластичных материалов, дающих сливную стружку [10]. Расчетные методы теплофизики резания имеют постоянное развитие и совершенствование [11].

Таким образом, основной задачей рассматриваемой методики является анализ предложенной системы взаимосвязанных математических выражений для расчета теплофизических параметров и температур резания, имеющих строгое научное обоснование и доведенных до уровня инженерных расчетов. Предложенная методика не требует проведения экспериментальных исследований и основана на использовании известных механических, теплофизических характеристик обрабатываемого и инструментального материалов. Результатами расчетов являются показатели: интенсивности тепловых потоков в плоскости сдвига, на передней и задней поверхностях инструмента, усредненные температуры этих поверхностей, и температуры резания. Используемые формулы заимствованы из литературных источников [5, 8, 9] и др. Первичными параметрами для расчета являются геометрические параметры инструмента, параметры сечения срезаемого слоя, а также составляющие силы резания, действующие в плоскости сдвига, на поверхностях лезвия, и расчет которых подробно рассмотрен в работах автора, например, [12, 13].

1. Расчет параметров теплофизики резания

Учитывая общепринятое положение теории резания о превращении механической энергии в тепловую, можно рассчитать тепловую мощность процесса резания, Вт

$$Q = P_z v / 60, \quad (1)$$

где P_z - тангенциальная (главная) составляющая силы, Н; v - скорость резания, м/мин.

Тогда интенсивность теплового источника в плоскости сдвига будет равна, Вт/(см²)

$$q_d = 1,67v(P_z - F_1 / K_l - F_2 - F_{zAC} - F_{zf}) \sin \beta / (ab). \quad (2)$$

Силы резания в выражении (2) обозначены на рис. 1 и соответствуют следующим: $F_1, F_2, F_{zAC}, F_{zf}$ - трения на передней и задней поверхностях, на участке округления режущей кромки в направлении скорости резания (ось Z). В выражении (2) также обозначены: β - угол сдвига; a, b - толщина и ширина среза, мм; K_l - коэффициент укорочения (утолщения) стружки.

Распределение теплового источника между заготовкой и стружкой задано коэффициентом b^* :

$$b^* = \frac{1}{1 + 1,5 \frac{K_l}{\sqrt{Pe}}}, \quad (3)$$

где безразмерный критерий Пекле равен

$$Pe = \frac{va}{6 \cdot \omega_1 \sin \beta},$$

ω_1 - коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, $\text{см}^2/\text{с}$.

Температура деформации или средняя температур в плоскости сдвига определяется через интенсивность источника (2) и рассчитывается в $^{\circ}\text{C}$:

$$T_d = \frac{60 \cdot \omega_1 K_l b^* q_d}{\lambda_1 v}, \quad (4)$$

где λ_1 - коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, $\text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$.

На передней поверхности на длине контакта стружки l_1 действует сила трения F_1 , а скорость стружки уменьшена по сравнению со скоростью резания в K_l - раз. Тогда, принимая равномерное распределение касательного контактного давления, интенсивность теплового источника от трения стружки на передней поверхности будет равна

$$q_{1t} = \frac{1,67 \cdot F_1 v}{b l_1 K_l}. \quad (5)$$

Аналогично можно получить выражение для расчета интенсивности теплового источника от трения заготовки на задней поверхности инструмента:

$$q_{2t} = \frac{1,67(F_2 + F_{zAC} + F_{zf})v}{b l_2}, \quad (6)$$

где l_2 - длина контакта по задней поверхности.

Подогрев металла, из которого образуется стружка, не учитываем, а характер распределения на задней поверхности температур, вызванных теплотой деформации, задается коэффициентом:

$$T_i^* = \sqrt{1 + \xi} - \sqrt{\xi}, \quad \xi = \frac{l_2}{2a} \text{tg} \beta. \quad (7)$$

Средние температуры от источников интенсивностью q_{1t}, q_{2t} (5), (6) составляют:

- на передней поверхности

$$T_c = a_1 - b_1 q_1, \quad (8)$$

где входящие параметры являются функциями

$$a_1 = f(T_d, \omega_1, \lambda_1, K_l, l_1, \nu, q_{1t}), \quad b_1 = f(\omega_1, \lambda_1, K_l, l_1, \nu);$$

- на задней поверхности

$$T_i = a_2 - b_2 q_2, \quad (9)$$

где входящие параметры являются функциями

$$a_2 = f(T_d, \omega_1, \lambda_2, K_l, l_1, \nu, q_{2t}), \quad b_2 = f(\omega_1, \lambda_1, l_2, \nu).$$

Выражения для расчета параметров a_1, b_1, a_2, b_2 приведены в литературных источниках, например, [8].

С другой стороны, температуры от итоговых тепловых потоков интенсивностью q_1, q_2 на адиабатических границах инструмента можно рассчитать по выражениям:

- на передней поверхности

$$T_1 = a_3 q_1 + b_3 q_2 = \frac{M_1 l_1}{\lambda_p} q_1 + \frac{N_2 l_2}{\lambda_p} q_2, \quad (10)$$

где λ_p - коэффициент теплопроводности инструментального материала;

- на задней поверхности

$$T_2 = a_4 q_2 + b_4 q_1 = \frac{M_2 l_2}{\lambda_p} q_2 + \frac{N_1 l_1}{\lambda_p} q_1. \quad (11)$$

Приняты аппроксимации параметров, входящих в выражения (10), (11), и подробно разобраны методы их расчета в литературе [8, 9].

В выражения (8) - (11) входят интенсивности тепловых потоков по передней и задней поверхности q_1, q_2 . Приравнявая попарно выражения для температур на передней поверхности по (8), (10) $T_c = T_1$, и температур на задней поверхности (9), (11) $T_i = T_2$, получим систему двух уравнений с двумя неизвестными q_1, q_2 .

Решение системы уравнений дает значения интенсивностей от стоков теплоты по передней и задней поверхностям q_1, q_2 :

$$q_2 = \frac{a_2 a_3 + a_2 b_1 - a_1 b_4}{a_4 b_1 + a_3 a_4 - b_4 b_3 + a_3 b_2 + b_1 b_2};$$
$$q_1 = \frac{a_1 - b_3 q_2}{a_3 + b_1}. \quad (12)$$

Тогда среднюю температуру передней и задней поверхностей находим по выражениям (10), (11):

$$T_1 = a_3 q_1 + b_3 q_2; \quad T_2 = a_4 q_2 + b_4 q_1. \quad (13)$$

Для проверки расчетов можно использовать выражения (8), (9):

$$T_c = a_1 - b_1 q_1; \quad T_i = a_2 - b_2 q_2. \quad (14)$$

Температура резания есть средняя температура на контактных поверхностях инструмента:

$$T_p = \frac{T_1 l_1 + T_2 l_2}{l_1 + l_2}. \quad (15)$$

Для расчета параметров теплофизики резания и анализа результатов разработан вычислительный алгоритм, реализованный в программе Cutting_Force.

Исходными данными для расчета являются:

- параметры резания – толщина, ширина, скорость, передний и задний угол, величина износа инструмента, радиус округления кромки;
- характеристики инструментального материала – коэффициент Пуассона, модуль Юнга, коэффициент теплопроводности;
- характеристики обрабатываемого материала – предел прочности, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности.

Результатами расчета по программе являются:

- параметры стружкообразования, силы резания;
- интенсивности тепловых потоков в плоскости сдвига, от трения на контактных площадках инструмента, тепловых стоков в тело инструмента;
- средние температуры на передней и задней поверхностях инструмента и температура резания.

Выходные параметры расчета организованы в результирующем файле, а также продублированы в виде графиков, встроенных в интерфейс программы.

2. Исходные данные и условия для расчета

Для расчета по выше приведенным формулам помимо сил резания необходимо знать теплофизические характеристики обрабатываемого и инструментального материалов. Пример расчета и анализ расчетных зависимостей проведен для условий обработки твердосплавным инструментом представителей групп обрабатываемых материалов: алюминиевых сплавов, углеродистых и низколегированных сталей, высоколегированных коррозионностойких сталей. Механические и теплофизические характеристики твердых сплавов приведены в таблице 1. Характеристики типовых представителей обрабатываемых материалов приведены в таблице 2.

Таблица 1 Механические и теплофизические характеристики твердых сплавов

Марка твердого сплава	E_2 , ГПа	μ_2	λ_p , Вт/(м °С)
T15K6	525	0,29	27,2
T5K10	500	0,29	38,5
BK8	610	0,29	54,4
BK6M	640	0,29	60,7

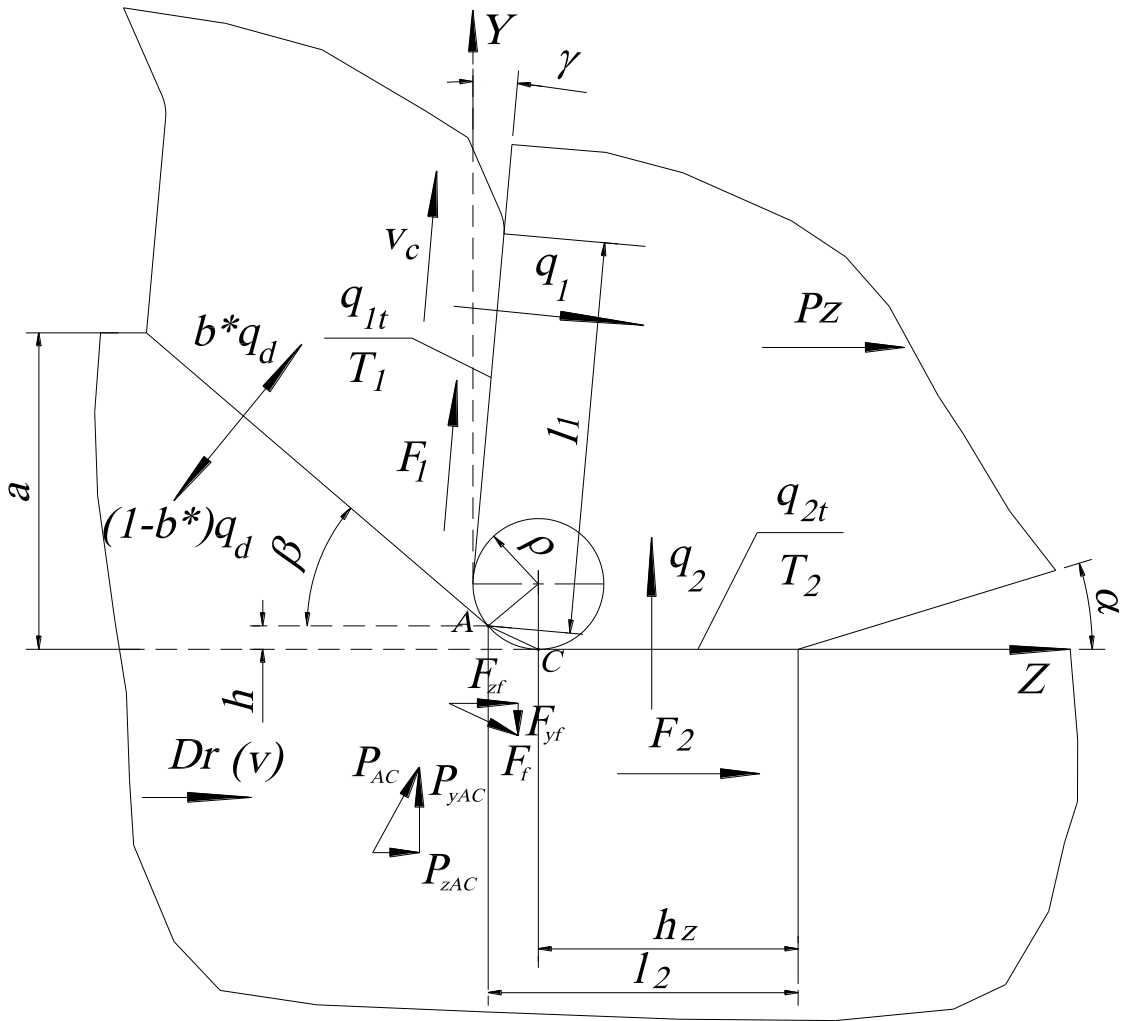


Рис. 1. Схема для расчета параметров теплофизики резания

Таблица 2 Механические и теплофизические характеристики обрабатываемых материалов

Марка материала	Группа	σ_b , МПа	НВ, МПа	E_1 , ГПа	μ_1	λ_1 , Вт/(м °С)	ω_1 , см ² /с
АМг6	Алюминиевый сплав	315	650	71	0,33	138,1	0,530
45	Углеродистая сталь	600	1739	200	0,27	40,2	0,080
12ХН3А	Легированная сталь	750	2174	200	0,27	31,0	0,079
12Х18Н10Т	Коррозионностойкая хромоникелевая сталь	510	1478	198	0,27	22,6	0,050

3. Анализ и пример результатов расчета

Для анализа результатов приведены графики, характеризующие параметры теплофизики и температуры резания при обработке конструкционных материалов резцами из твердого сплава марки T15K6:

- интенсивность теплового потока в плоскости сдвига в зависимости от скорости резания для материалов из табл. 2 на рисунке 2 (толщина среза 0,2 мм, ширина 3 мм, износ резца по задней поверхности 0,5 мм);

- интенсивности тепловых стоков по передней и задней поверхности в зависимости от скорости резания для стали марки 45 на рисунке 3 (скорость резания 150 м/мин);

- температуры передней и задней поверхностей резца в зависимости от толщины срезаемого слоя для стали марки 45 на рисунке 4;

- температуры передней и задней поверхности резца в зависимости от величины износа для стали марки 45 на рисунке 5;

- температуры резания в зависимости от скорости для материалов из табл. 2 на рисунке 6.

Полученные количественные соотношения рекомендованы для использования при анализе режимов и условий различных видов механической обработки резанием.

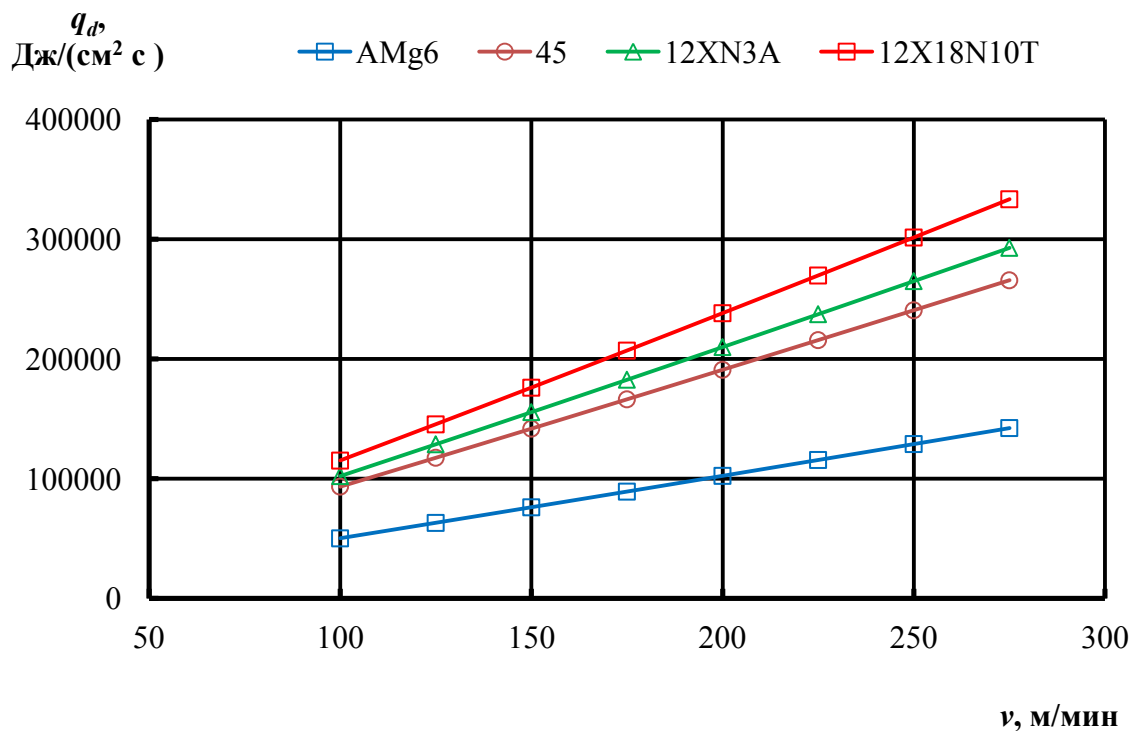


Рис. 2. Влияние скорости резания на интенсивность теплового потока в плоскости сдвига для различных конструкционных материалов

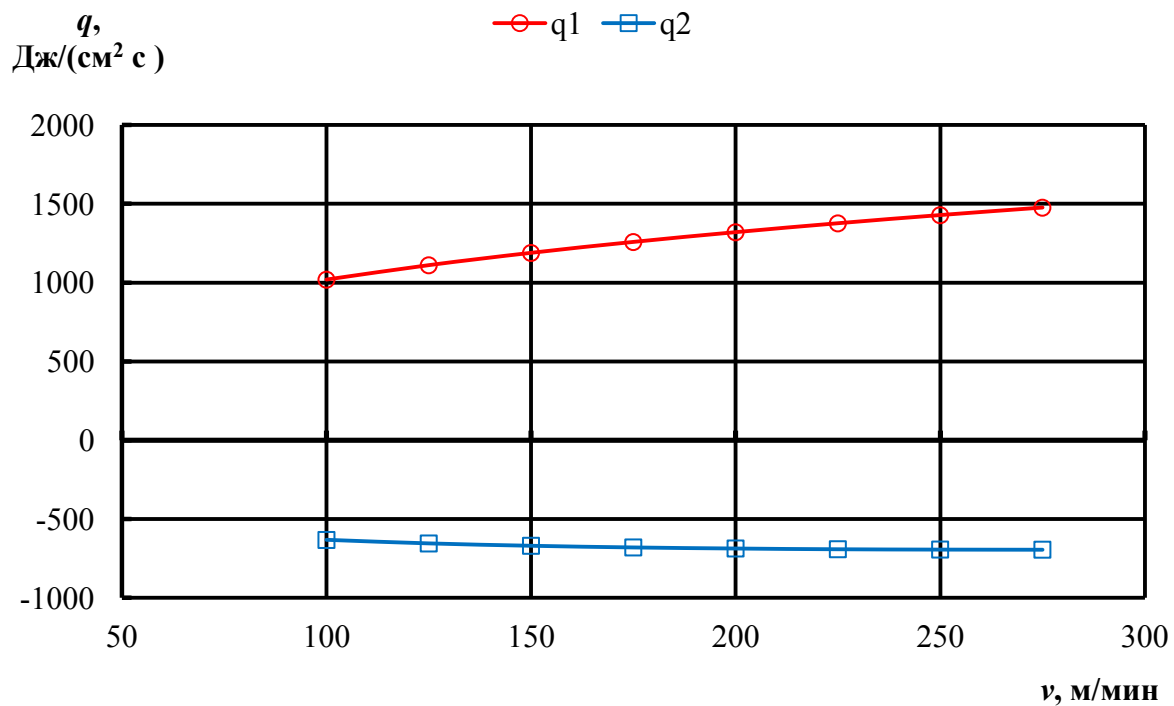


Рис. 3. Влияние скорости резания на интенсивность тепловых стоков на передней и задней поверхностях

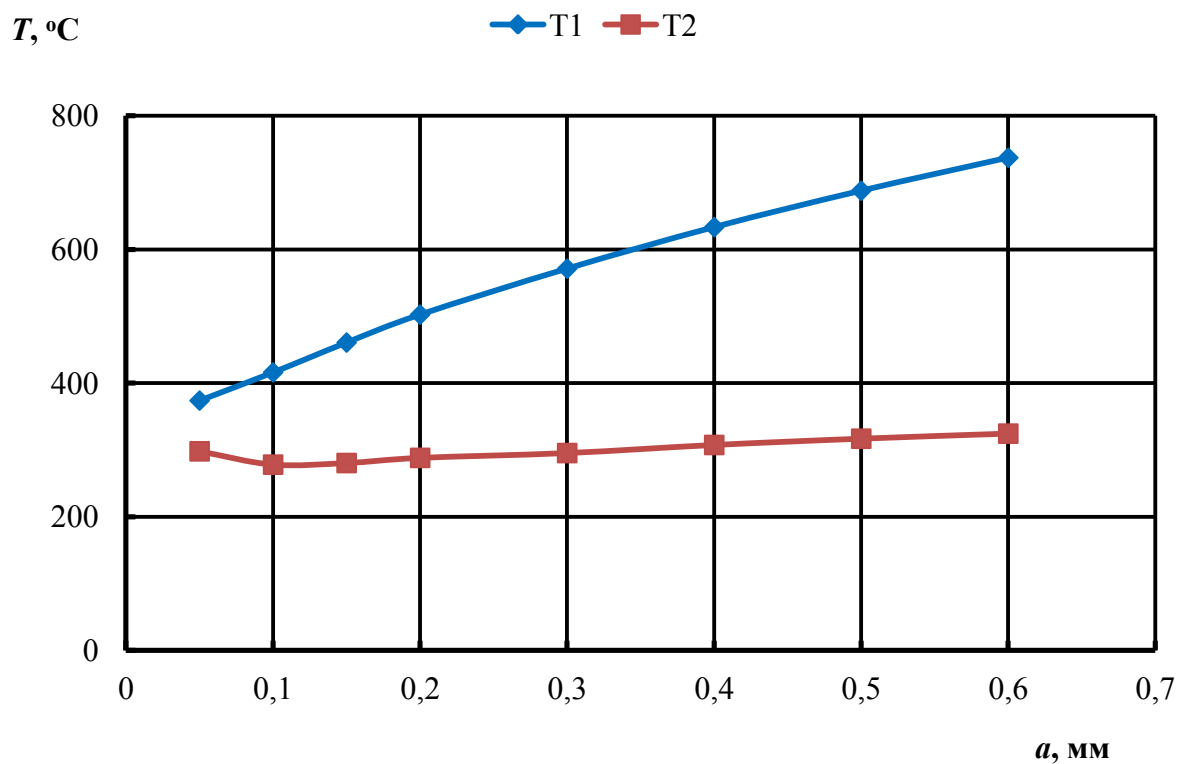


Рис. 4. Влияние толщины среза на температуру передней и задней поверхности

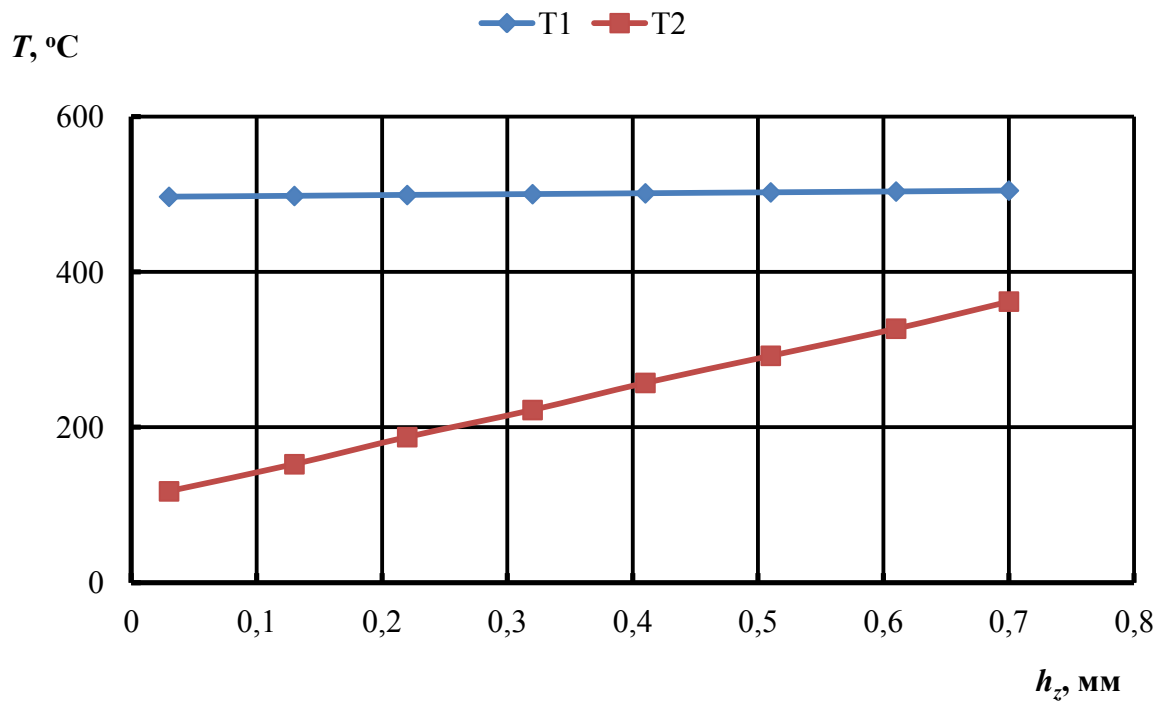


Рис. 5. Влияние износа реза на температуру передней и задней поверхности

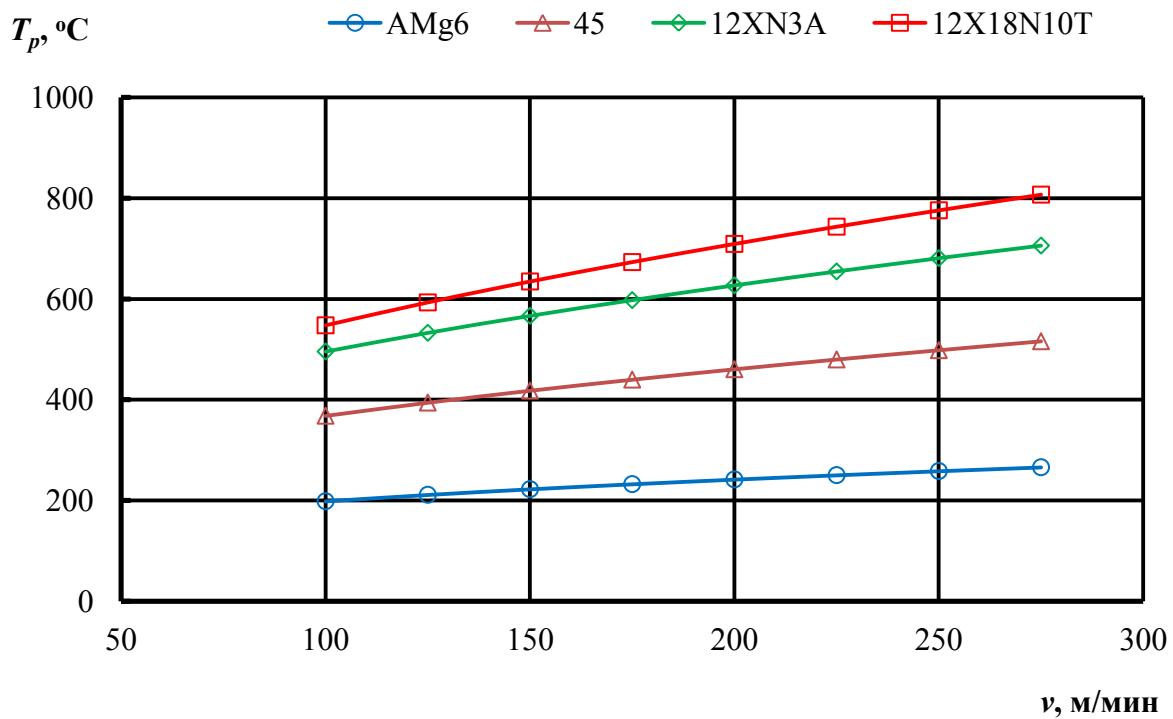


Рис. 6. Влияние скорости резания на среднюю температуру резания для различных конструкционных материалов

4. Оптимизация режимных параметров с ограничением по температуре резания

Оптимизация режимных параметров выполнена на примере точения заготовки из коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т резцами из твердого сплава марки Т15К6. Использована обобщенная степенная зависимость, связывающая скорость, стойкость инструмента, подачу и глубину или толщину и ширину срезаемого слоя:

$$v = \frac{C_v}{T^{m_v} s^{y_v} t^{x_v}} = \frac{C_v (\sin \varphi)^{(y_v - x_v)}}{T^{m_v} a^{y_v} b^{x_v}}, \quad (16)$$

где постоянные и показатели степеней заимствованы из справочника по режимам резания труднообрабатываемых материалов [14] и приведены в Таблице 3, угол φ - угол в плане.

Таблица 3 Постоянные и показатели степеней для выражения (16)

Подача s , мм/об	C_v	m_v	y_v	x_v
$\leq 0,2$	580	0,35	0,15	0,15
$\geq 0,2$	360	0,35	0,45	0,15

Для получения уравнения температуры резания, используя разработанную расчетную программу с использованием выражений (1) - (15), рассчитаны частные зависимости температуры от толщины, ширины среза и скорости резания:

$$T_p = 977,32a^{0,29}; T_p = 566,65b^{0,03}; T_p = 86,96v^{0,4}. \quad (17)$$

После объединения выражений (17) получено обобщенное уравнение для расчета температуры резания:

$$T_p = C_T v^{m_T} a^{y_T} b^{x_T}, \quad (18)$$

где постоянная и показатели степеней равны:

$$C_T = 136,7; m_T = 0,4; y_T = 0,29; x_T = 0,03.$$

Оптимизация режимных параметров проведена по методу линейного программирования. Критерием оптимальности принят минимум штучного времени обработки, который математически выражен целевой функцией с соответствующей заменой переменных при постоянном значении ширины среза $b = const$:

$$f_0 = x_1 + x_2 \rightarrow \max, \quad x_1 = \ln(n) = \ln(1000v / \pi / d); \quad x_2 = \ln(100a). \quad (19)$$

Поиск экстремума целевой функции (19) проведен с учетом технологических ограничений по скорости при заданной стойкости инструмента и температуре резания. Математические выражения для технологических ограничений получены логарифмированием выражений (16), (18) с заменой переменных по (19). после логарифмирования и преобразований ограничения примут вид:

$$x_1 + y_v x_2 \leq B_v; \quad m_T x_1 + y_T x_2 \leq B_T. \quad (20)$$

Иллюстрация решения задачи линейного программирования, выраженной уравнениями (20) для ограничений: стойкость $T = 30$ мин, температура резания $T_p = 750$ °С, показана на рис. 7.

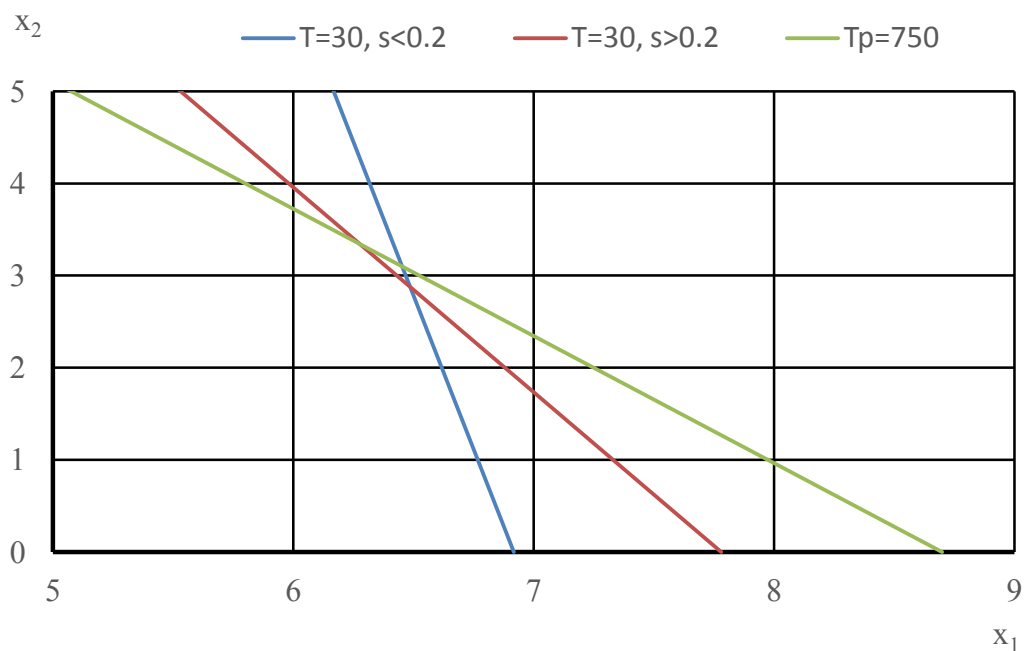


Рис. 7. Графики линейризованных ограничений по скорости при заданной стойкости и температуре резания

В соответствии с положениями линейного программирования оптимальной точкой на графиках рис. 7 является точка пересечения линии ограничения по температуре резания и по скорости при заданной стойкости ($T = 30, s \geq 0,2$), которая имеет координаты: $x_1 = 6,28; x_2 = 3,34$. Для выбранных значений диаметра заготовки $d = 100$ мм и угла в плане инструмента $\varphi = 60^\circ$ соответствующие оптимальные режимные параметры составляют:

$$n = 532,2 \text{ об/мин}, v = 167,2 \text{ м/мин}, a = 0,28 \text{ мм}, s = 0,33 \text{ мм/об}$$

Заключение

Полученные расчетные зависимости качественно и количественно подтверждают основные теоретические положения по теплофизике и температуре резания и имеющиеся в литературных источниках экспериментальные зависимости:

- тепловые потоки и температуры резания существенно различаются для различных конструкционных материалов и возрастают с увеличением прочности и снижением теплопроводности материала. Температура резания может быть одним из основных показателей обрабатываемости резанием;

- тепловой сток на передней поверхности направлен в тело инструмента, а на задней поверхности имеет отрицательное значение, т.е. направлен из инструмента в заготовку;
- скорость резания оказывает наиболее интенсивное влияние на температуру резания; с увеличением толщины срезаемого слоя увеличивается температура передней поверхности инструмента;
- увеличение износа приводит к росту температуры задней поверхности и средней температуры резания;
- при обработке труднообрабатываемых материалов, например, коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т, оптимальные режимные параметры должны определяться с учетом ограничений по скорости при заданной стойкости инструмента и температуре резания.

Список литературы

1. Грубый С.В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
2. Розенберг Ю.А. Резание материалов: учебник. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2007. 294 с.
3. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: учебник. М.: Высш. школа, 2009. 534 с.
4. Циркин А.В., Смирнов М.Ю. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями: методические указания к лабораторным работам. Ульяновск: Изд-во Ульянов. гос. техн. ун-та, 2007. 30 с.
5. Неумоина Н.Г., Белов А.В. Тепловые процессы в технологической системе резания: учеб. пособие. Волгоград: Изд-во Волгоград. гос. техн. ун-та, 2006. 83 с.
6. Ismail Lazoglu, Yusuf Altintas. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining // Intern. J. of Machine Tools & Manufacture. 2002. Vol. 42. No. 9. Pp. 1011–1022. DOI: [10.1016/S0890-6955\(02\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00039-1)
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
8. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
9. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 287 с.
10. Пушных В.А., Бибик В.Л. Сравнение двух методов расчета температуры резания // Известия Томского политехн. ун-та. 2004. Т. 307. № 3. С. 102-104.
11. Мазур Н.П. Усовершенствование аналитических методов расчетов температурных полей в системе резания // Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та. 2015. № 3-1(33-1). С. 92-99.

12. 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)
13. Грубый С.В. Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 1. С. 25–37. DOI: [10.24108/aplts.0117.0000058](https://doi.org/10.24108/aplts.0117.0000058)
14. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич и др. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1986. 239 с.

Calculating Cutting Thermal Physics Parameters of Plastic Materials

S.V. Grubyi^{1,*}

* grusv@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: thermal capacity; heat flow intensity; temperature; thickness of the cutting layer; cutting speed; tool wear

The thermal physics parameters and a cutting temperature belong to the output performances to characterise a process and allow a rational selection of machining modes and conditions. In machining hard-to-cut materials the utmost cutting temperature is a technological restriction and defines tool wear rate and intensity. The cutting temperature also has impact on the heat extension of tool and the finished machining.

The subject is to study thermal physics parameters and cutting temperature when machining the plastic materials by a hard-alloy tool. The objective is to develop a technique to calculate these parameters. A calculation method for the analysis of process parameters is used.

Calculation results for the cutting temperature were compared with experimental ones published in the literature sources. A novelty of the technique is that there is no need in conducting the experimental studies to calculate the thermal physics parameters. Calculation is based on using known mechanical and thermal physics characteristics of machined and tool materials. The calculation results are parameters, namely heat flow intensities in the conditional shear plane, on the contact surfaces of tool, temperatures of these surfaces, averaged cutting temperature - depending on the cutting speed, thickness of cutting layer, tool wear value.

A sequence of calculations is implemented in the developed software in the programming algorithmic language with results in graphic and tabular representations. The calculation technique is designed for conducting research activities and engineering designs in the field of machining.

References

1. Grubyj S.V. *Optimizatsiia protsessa mekhanicheskoy obrabotki i upravlenie rezhimnymi parametrami* [Optimization of the machining process and control regime parameters]. Moscow: BMSTU Publ., 2014. 149 p. (in Russian).
2. Rosenberg Yu.A. *Rezanie materialov* [Cutting of materials]: a textbook. Kurgan: Kurgan State Univ. Publ., 2007. 294 p. (in Russian).

3. Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov* [Cutting of materials]: a textbook. Moscow: Vysshaia Shkola Publ., 2009. 534 p. (in Russian).
4. Tsirkin A.V., Smirnov M.Yu. *Fizicheskie osnovy protsessa rezaniia i iznashivaniia rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiiami* [Physical fundamentals of the cutting process and wear of cutting tools with wear-resistant coatings]. Ul'ianovsk: Ul'ianovsk State Technical Univ. Publ., 2007. 30 p. (in Russian).
5. Neumoina N.G., Belov A.V. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskoi sisteme rezaniia* [Thermal processes in technological cutting system]: a textbook. Volgograd: Volgograd State Technical Univ. Publ., 2006. 83 p. (in Russian).
6. Ismail Lazoglu, Yusuf Altintas. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. *Intern. J. of Machine Tools & Manufacture*, 2002, vol. 42, no. 9, pp. 1011–1022. DOI: [10.1016/S0890-6955\(02\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00039-1)
7. Silin S.S. *Metod podobiia pri rezanii materialov* [The method of similarity during cutting materials]. Moscow: Mashinostroiye Publ., 1979. 152 p. (in Russian).
8. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki materialov* [Thermophysics of machining of materials]. Moscow: Mashinostroiye Publ., 1981. 279 p. (in Russian).
9. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]: a textbook. Moscow: Mashinostroiye Publ., 1990. 287 p. (in Russian).
10. Pushnykh V.A., Bibik V.L. Comparison of two methods for calculating the temperature of the cutting. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic Univ.], 2004, vol. 307, no. 3, pp. 102-104 (in Russian).
11. Mazur N.P. Improvement of analytical methods of calculation of temperature fields in the cutting system. *Vektor nauki Tol'iattinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector Science of the Tol'iatti State Univ.], 2015, no. 3-1(33-1), pp. 92-99 (in Russian).
12. Grubyj 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)
13. Grubyj S.V. Calculating parameters of chip formation and cutting forces of plastic materials. *Mashiny i ustanovki: Proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiia* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2017, no. 1, pp. 25-37. DOI: [10.24108/aplts.0117.0000058](https://doi.org/10.24108/aplts.0117.0000058) (in Russian)
14. *Rezhimy rezaniia trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Cutting hard materials]: a handbook / Ia.L. Gurevich a.o. 2nd ed. Moscow: Mashinostroiye Publ., 1986. 239 p. (in Russian).