

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. И. САГРАДЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ
 КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Известно [1, 2], что одним из превалирующих факторов, влияющих на износ инструмента, является теплота, выделяющаяся в процессе резания, поэтому представляет интерес исследование температуры резания при точении материалов резцами из быстрорежущих сплавов с нитридом титана, типа В14М7К25, занимающих промежуточное положение по своим физико-механическим свойствам между быстрорежущими сталями и твердыми сплавами [3] и имеющих по сравнению с ними высокую теплопроводность.

Работа посвящена исследованию влияния режимов резания на температуру контакта при обработке стали 45 резцами из Р18 и В14М7К25. Для изучения физических явлений на контактных поверхностях и топографии изнашивания необходимо располагать не только качественной и усредненной характеристиками для контакта, а также достаточно точными данными, определяющими тепловое поле резца, стружки и детали в целом. Используемые нами метод и программа были предложены в [2], которые позволяют вести расчеты и проследить за динамикой изменения температурных полей во времени.

При рассмотрении источников возникновения и путей распространения тепла при резании видно [1], что имеет место сложное переплетение маршрутов движения тепловых потоков, поскольку тепло от каждого из трех основных источников — деформации, трения на передней и задней поверхностях инструмента распределяется между всеми телами, участвующими в процессе. Для решения задачи должны быть сформулированы начальные и граничные условия: в расчетах по времени $\tau = 0$ принята $\theta = 20^\circ\text{C}$. В качестве исходных данных выбраны значения составляющих сил резания P_z, P_y, P_x , режимов резания V, S, t , усадки стружки ξ , переднего угла γ , главного угла в плане φ , а также теплофизические характеристики λ, C, ρ , значения которых приведены в таблице и на рис. 2, 3.

Интенсивность внутренних источников тепла в зоне пластической деформации определяется согласно [4]:

$$W_D = K_D \gamma_s U_s$$

где σ_1, σ_2 — интенсивности деформации и ее скорости; K_D — коэффициент, учитывающий количество энергии деформирования, переходящей в тепловую; I — механический эквивалент тепла.

Таблица

Обр. мат.	Инстр. мат.	$\bar{\epsilon}$	λ	C	F	γ	τ
Сталь 45	В14М7К25 Р18	3	0,082	1,1	8,4	10^3	45°
		3	0,065	1,11	8,7	10^3	45°

Для стали 45 $\lambda = 0,96 \frac{\text{ккал}}{\text{см} \cdot \text{с}} \cdot ^\circ\text{C}$; $C = 1,2 \frac{\text{ккал}}{\text{г} \cdot \text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$; $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$.

Интенсивность источников тепла на поверхностях инструмента, образуемая силами трения, определяется формулой

$$W_f = \tau V / J \cdot h,$$

где τ — касательное напряжение; V — касательная скорость движения теплового источника; h — длина элементарного объема контакта.

Величины σ_1, σ_2, τ и составляющие скорости определены экспериментально и аналитическим путем [2, 4].

Применительно к условиям резания уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\begin{aligned} C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + W. \quad (1) \end{aligned}$$

При решении задачи конечно-разностным методом [2] выбираем граничные условия (рис. 1):

1) вдоль $BC, CD, EF, FH, SK, KL, IO$, на границах контакта металла с окружающей средой принимаем условия третьего рода:

$$\lambda \partial T / \partial n = \alpha (T - \theta);$$

2) вдоль границ AB, DF, IP, PO, SR, RA , удаленных от действующих тепловых источников, принимаем условия второго рода:

$$\partial T / \partial n = 0;$$

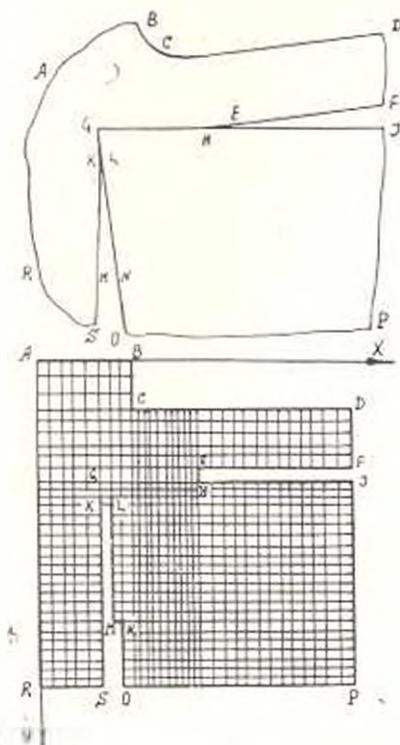


Рис. 1. Модель для расчета температурного поля (плоского) на ЭВМ [2].

3) вдоль границ контакта «изделие—резец», «стружка—резец», HG и GK существует равенство контактных температур, т. е. условия идеального контакта $T^+ = T^-$

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right]^+ = \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right]^-.$$

Вдоль грани HG $T_{рез} = T_{рез}$, а вдоль H_1G — $T_{пол} = T_{рез}$.

Вся область, в пределах которой ведется вычисление, разбивается неравномерной прямоугольной сеткой $\{x_0, x_1, \dots, x_n, y_0, y_1, \dots, y_m\}$ на прямоугольные элементы с величиной шага h_i, h_j по направлениям осей X и Y : $h_i = X_i - X_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$); $h_j = Y_j - Y_{j-1}$ ($j = 1, 2, \dots, m-1$).

Вид конечно-разностного уравнения, записываемого в узлах сетки, зависит от выбора схемы решения. Неявная экономичная схема Писмана—Ракфорда [2] двухслойная и является наиболее приемлимой для решения дифференциального уравнения. Метод основан на переходе от одного временного слоя на другой, путем введения промежуточного слоя.

Уравнение (1) применительно к методу Писмана—Ракфорда в конечных разностях записывается [2]:

а) в первую половину промежутка (неявное по X —по строкам)—

$$\begin{aligned} C_{ij}^k \rho ((T_{ij}^{k+1/2} - T_{ij}^k) / 0,5\Delta t) + V_{X_{ij}} (T_{ij}^{k+1/2} - T_{i-1/2}^k) / h_i + \\ + V_{Y_{ij}} (T_{ij}^k - T_{ij}^{k-1/2}) / h_j = 1/\bar{h}_i [K_{i+1/2}^k (T_{i+1/2}^{k+1/2} - T_{ij}^{k+1/2}) / h_{i+1} - \\ - K_{i-1/2}^k (T_{ij}^{k+1/2} - T_{i-1/2}^{k+1/2}) / h_i] + 1/\bar{h}_j [K_{i+1/2}^k (T_{i+1/2}^k - T_{ij}^k) / h_{i+1} - \\ - K_{i-1/2}^k (T_{ij}^k - T_{i-1/2}^k) / h_i] + W; \end{aligned} \quad (2)$$

б) во вторую половину промежутка (неявное по Y —по столбцам)—

$$\begin{aligned} C_{ij}^{k+1/2} \rho ((T_{ij}^{k+1} - T_{ij}^{k+1/2}) / 0,5\Delta t) + V_{X_{ij}} ((T_{ij}^{k+1/2} - T_{i-1/2}^k) / h_i + \\ + V_{Y_{ij}} ((T_{ij}^{k+1} - T_{ij}^{k+1/2}) / h_j) = 1/\bar{h}_i [K_{i+1/2}^{k+1/2} ((T_{i+1/2}^{k+1/2} - T_{ij}^{k+1/2}) / h_{i+1} - \\ - K_{i-1/2}^{k+1/2} ((T_{ij}^{k+1/2} - T_{i-1/2}^{k+1/2}) / h_i)] + 1/\bar{h}_j [K_{i+1/2}^{k+1/2} ((T_{i+1/2}^{k+1} - T_{ij}^{k+1}) / h_{i+1} - \\ - K_{i-1/2}^{k+1/2} (T_{ij}^{k+1} - T_{i-1/2}^{k+1}) / h_i] + W_{ij}^{k+1/2}, \end{aligned} \quad (3)$$

здесь T —температура в точке X_i, Y_j в момент t_k времени;

$$C_{ij}^k = C(T_{ij}^k); \quad K_{i+1/2}^k = K(T_{ij}^k) + K(T_{i+1/2}^k); \quad W_{ij}^k = W(T_{ij}^k);$$

$$\bar{h}_i = (h_i + h_{i+1})/2; \quad \bar{h}_j = (h_j + h_{j+1})/2;$$

$V_{X_{ij}}, V_{Y_{ij}}$ —проекция скорости в соответствующей точке X_i, Y_j .

На границе контакта KG уравнения примут вид:

а) по строкам —

$$\begin{aligned} & (C_{ui,j}^k \rho_u h_i / 2 \bar{h}_i + C_{pi,j}^k \rho_p (h_{i-1} / 2) / \bar{h}_i) ((T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k) / 0,5 \Delta t + C_{ai,j}^k \rho_u h_i / 2 \bar{h}_i \times \\ & \times (V_{X_{ij}} ((T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i-1,j}^{k+1/2}) + V_{Y_{ij}} ((T_{i,j}^k - T_{i,j-1}^k) / h_j) = [K_{ui+1/2,j}^k h_j / 2 + \\ & + K_{pi-1/2,j}^k h_i / 2) ((T_{i+1,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^{k+1/2}) / h_{i+1}) - \\ & - [(K_{pi,j+1}^k h_i ((T_{i,j+1}^k - T_{i,j}^k) / h_{i+1}) - \\ & - K_{ui,j-1/2}^k \bar{h}_j ((T_{i,j}^k - T_{i,j-1}^k) / h_j)] + W_{ij}^k h_i / 2 \bar{h}_i; \end{aligned} \quad (4)$$

б) по столбцам —

$$\begin{aligned} & (C_{uij}^{k+1/2} \rho_u h_i / 2 \bar{h}_i + C_{pij}^{k+1/2} \rho_p h_{i-1} / 2 \bar{h}_i) (T_{ij}^{k+1} - T_{ij}^{k+1/2}) / 0,5 \Delta t + \\ & + C_{aij}^{k+1/2} \rho_u h_i / 2 \bar{h}_i (V_{X_{ij}} (T_{ij}^{k+1/2} - T_{i-1,j}^{k+1/2}) / h_i + \\ & + V_{Y_{ij}} (T_{ij}^{k+1} - T_{i,j-1}^{k+1}) / h_j) = [(K_{ui+1/2,j}^{k+1/2} h_j / 2 + K_{pi-1/2,j}^{k+1/2} h_{i-1} / 2) \times \\ & \times (T_{i+1,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^{k+1/2}) / h_{i+1} - (K_{ui+1/2,j}^{k+1/2} h_j / 2 + K_{pi-1/2,j}^{k+1/2} h_{i-1} / 2) \times \\ & \times (T_{i,j+1}^{k+1/2} - T_{i,j}^{k+1/2}) / h_{j+1}] + [K_{ai+1/2,j}^{k+1/2} \bar{h}_i (T_{i,j+1}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1}) / h_{j+1} - \\ & - K_{aij}^{k+1/2} \bar{h}_i (T_{ij}^{k+1} - T_{i,j-1}^{k+1}) / h_j] + W_{ij}^{k+1/2} h_j / 2 \bar{h}_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где C_u, ρ_u, K_u — теплофизические параметры обрабатываемого материала; C_p, ρ_p, K_p — параметры режущего инструмента.

Уравнения по каждому из направлений (строка, столбец) решаются методом прогонки. Например, преобразованное уравнение для расчета температур при прогонке по строке принимает вид:

$$a_{ij}^k T_{i-1,j}^{k+1/2} + b_{ij}^k T_{ij}^{k+1/2} + c_{ij}^k T_{i+1,j}^{k+1/2} = f_{ij}^k, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} a_{ij}^k &= V_{X_{ij}}^k / \bar{h}_i + \lambda_{i-1/2,j}^k \bar{h}_i / h_i; \\ -b_{ij}^k &= 1 / 0,5 \Delta t + V_{X_{ij}}^k / \bar{h}_i + \lambda_{i-1/2,j}^k \bar{h}_i / h_i + \lambda_{i-1/2,j}^k \bar{h}_i / h_{i-1}; \\ c_{ij}^k &= \lambda_{i+1/2,j}^k \bar{h}_i / h_{i+1}; \\ -f_{ij}^k &= T_{i,j-1}^k (V_{Y_{ij}}^k / \bar{h}_i + \lambda_{i,j-1/2}^k \bar{h}_i / h_j) + T_{i,j}^k (1 / 0,5 \Delta t - V_{Y_{ij}}^k / \bar{h}_i - \\ & - \lambda_{i,j-1/2}^k \bar{h}_i / h_{j+1}) + T_{i,j+1}^k (\lambda_{i,j+1/2}^k \bar{h}_i / h_{j+1}) + W_{ij}^k; \\ \lambda_{i-1/2,j}^k &= K_{i-1/2,j}^k / C_{aij}^k \rho_p. \end{aligned}$$

Задача решена на ЭВМ «БЭСМ-6». Результаты вычислений при точении стали 45 резцами из В14М7К25 и Р18 приведены на рис. 2, 3. Задача решена для оптимальных параметров режимов резания (V , S , t), соответственно, для резцов из обоих материалов: $V_{до} = 65$ м/мин, $V_{до} = 45$ м/мин при одинаковых $S = 0,3$ мм/об и $t = 2$ мм. Общее время резания было задано $\tau = 0,12$ с, а временной шаг — $\tau = 0,5 \cdot 10^{-3}$ с.

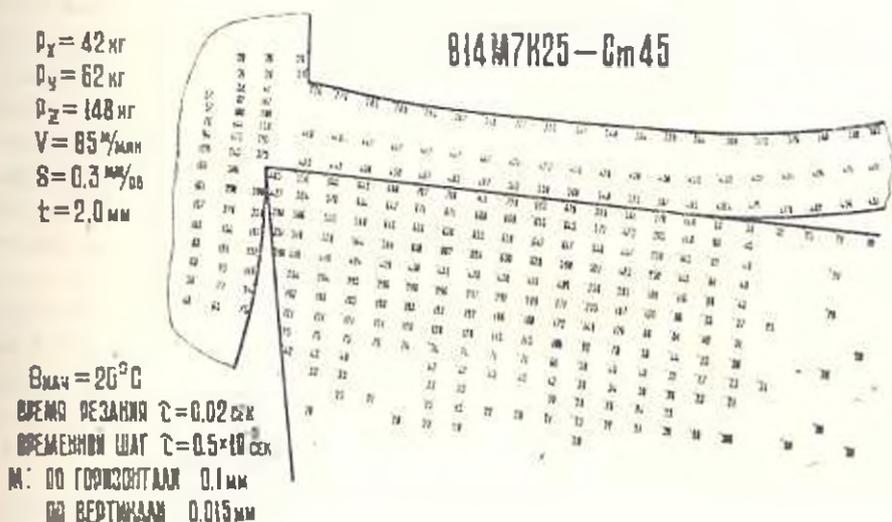


Рис. 2. Температурные поля в резце из В14М7К25 в сходящей стружке и детали.

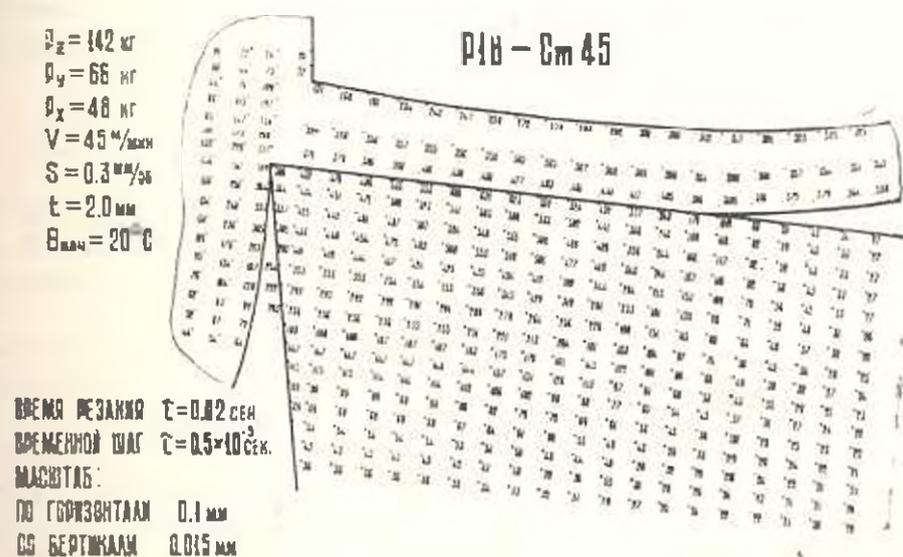


Рис. 3. Температурные поля в резце из Р18, в сходящей стружке и детали.

С помощью этих расчетов в течение заданного времени $\tau = 0,02$ с в зависимости от временного шага можно проследить за динамикой изменения температурного поля с $\tau = 0$ до $\tau = 0,02$ с.

При решении задачи через $\tau = 0,02$ с наблюдалась стабилизация температуры в контакте на передней поверхности резца, где действует наиболее мощный поток тепла.

Как видно из рис. 2, 3, в контакте передней поверхности в обоих случаях обнаружены наиболее высокие температуры. Для резцов из P18 скорость резания существенно ниже, чем у В14М7К25, соответственно и ниже температура на $100-120^\circ\text{C}$. Глубина проникновения температурного поля здесь намного превосходит соответствующие значения при резании инструментами из В14М7К25. Структурные превращения и изменения микротвердости обнаружены только на контактных поверхностях, что объясняется малым временем ($\tau = 0,02$ с) воздействия теплового потока, который успеваеt проникнуть вглубь тела инструмента. Более глубокое проникновение у резцов из P18 объясняется малой теплопроводностью этого инструментального материала. При этом теплосодержание рабочего объема резца быстро растеt.

В обоих случаях обнаружено распределение максимальной температуры в конце пластического контакта на передней поверхности резца, соответственно, равной 743°C и 632°C . Полученные данные хорошо коррелируют с [5] и результатами исследований [2, 6]. При обработке резцами из обоих инструментальных материалов обнаружено, что температура в сходящей стружке почти стабильная.

Анализируя картину тепловых полей вблизи задней контактной поверхности, можно констатировать, что здесь температура намного ниже, чем на передней поверхности, но она достаточна для того, чтобы на задней поверхности могла произойти динамическая рекристаллизация. Это подтверждается выходом из строя резца именно по главной задней поверхности.

Выводы

1. При точении стали 45 на одинаковых скоростях резания средняя температура в зоне контакта при обработке резцами из В14М7К25, на $60-70^\circ\text{C}$ ниже, чем при P18, что объясняется высокой теплопроводностью быстрорежущего сплава.

2. Обнаружено, что температура в зоне контакта стабильно провалилась через $0,02$ с времени и максимальное ее значение наблюдалось за пределами пластического контакта.

3. Температура в сходящей стружке при точении сталей 45 резцами из обоих материалов в течение $0,02$ с, в основном, стабилизировалась, а температура инструмента и деталей продолжала повышаться.

4. Найдено, что с помощью тепловых полей можно прогнозировать топографию и характер изнашивания инструмента.

ՎԵՐՋԱՎՈՐ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ՋԵՐՄԱՅԻՆ
ԴԱՇՏՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Քննարկվում են վերջավոր տարրերուձյունների մեթոդով կտրման պրոցեսում կոնտակտի միջակայքում ստացված ջերմային դաշտերը:

Ստացվում է, որ ջերմաստիճանի կտրման պրոցեսում հաստատուն է դառնում 0,02 վայրկյանում: Ջերմության մեծագույն արժեքը դիտվում է կտրիչի և հեռացող տաշեղի կոնտակտի պլաստիկ միջակայքից դուրս տիրույթում՝ առջևի մակերևույթի վրա: Արդյունքներն օպտացործվում են նոր գործիքանույթներով պողպատի մշակման մամանակ կտրման պրոցեսում կոնտակտային երևույթները բացահայտելու, ինչպես նաև գործիքի մաշման մեխանիզմը պարզելու համար:

Կտրման միջակայքում ստացված ջերմային դաշտի օղնուձյամբ հնարավոր է կանխագուշակել մաշման բնույթը և տեղադրությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Резников А. Н. Теплофизика резания. М., «Машиностроение», 1969, с. 282.
2. Под ред. Остафьева В. А. Физические основы процесса резания металлов. Киев, «Вища школа», 1976, с. 135.
3. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. М., «Металлургия», 1975, с. 583.
4. Воброн В. Ф. Основы теории резания металлов. М., «Машиностроение», 1975, с. 342.
5. Саградян А. И. Исследование режущих свойств новых быстрорежущих сплавов с интерметаллидным упрочнением. Автореф. канд. диссерт. Киев, ИСМ АН УССР, 1980.
6. Кремнев А. С., Синополикина В. А. Изменение структуры и свойств в режущей части инструментов из быстрорежущих сталей в процессе непрерывного точения. «Вестник машиностроения», 1973, № 5, с. 63—67.