УДК 621.9

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯВ.Ф.БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ¹, М.СЧЕРЕК²¹ Рыбинский государственный авиационный технологический университет имени П.А.Соловьева, Рыбинск, Россия² Институт экологически рациональных технологий Национального научно-исследовательского института, Радом, Польша

Изложена методика определения температуры в поверхностном слое обрабатываемой детали лезвийным инструментом с учетом объемного источника тепла в зоне резания, на основе которой предлагается расчетом определять погрешности обработки, обусловленные тепловым воздействием на режущий инструмент и обрабатываемую заготовку. При определении теплового воздействия на режущую часть инструмента учитываются тепловые потоки, действующие по передней и задней поверхности. При определении теплового воздействия на обрабатываемую деталь учитываются тепловые потоки, действующие от деформации материала при удалении стружки и задней поверхности режущего инструмента. Температура в зоне резания определяется суммированием температуры в поверхностном слое, возникающей от пластических деформаций материала в зоне резания, трения стружки о переднюю поверхность режущего инструмента и трения задней поверхности режущего инструмента об обработанную поверхность. Особенность предлагаемого метода состоит в том, что учитываются физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов (температуропроводность, предел прочности теплопроводность, удельная объемная теплоемкость), режимы обработки (скорость резания, подача и глубина резания), размеры обрабатываемой заготовки и режущего инструмента, геометрия режущей части инструмента (передний и задний углы, радиус при вершине резца в плане, радиус округления режущей инструмента, главный и вспомогательный углы в плане). В расчетах учитывается изменение интенсивности объемных тепловых потоков в зоне резания по их высоте.

Ключевые слова: обработка резанием; тепловые потоки в зоне резания; температура в зоне резания; погрешность обработки; режущий инструмент; обрабатываемая заготовка

Как цитировать эту статью: Безъязычный В.Ф. Развитие исследований тепловых процессов в технологии машиностроения / В.Ф.Безъязычный, М.Счерек // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 395-400. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.395

Введение. Рассматривая вопрос об изучении тепловых явлений в зоне резания, необходимо обратиться к работам выдающихся ученых в области технологии машиностроения, изучавших влияние тепловых явлений на точность обработки и качество поверхностного слоя деталей. Это прежде всего профессора А.Н.Резников, А.Д.Макаров, С.С.Силин, Н.В.Талантов, М.Ф.Полетика, В.В.Максаров [2, 3, 10], а также зарубежные авторы [8, 9, 11 и др.]. Наиболее подробно изложена схема действия тепловых источников в работе А.Н.Резникова (рис.1) [5], но расчетное определение их влияния на погрешности обработки изучено недостаточно.

В зоне резания действуют следующие тепловые потоки:

$$Q_{\text{и}} = Q_{\text{ди}} + Q_{\text{тз}} - Q_{\text{з}},$$

$$Q_{\text{с}} = Q_{\text{дс}} + Q_{\text{тп}} - Q_{\text{п}},$$

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{з}},$$

где $Q_{\text{ди}}$ – часть теплоты деформации, уходящей в изделие; $Q_{\text{тз}}$ – часть теплоты, возникающей в результате трения между изделием и резцом; $Q_{\text{з}}$ – часть теплоты, возникающая в результате теплообмена на площадке контакта поверхности резания с задней поверхностью инструмента; $Q_{\text{дс}}$ – часть теплоты деформации, уходящей в стружку; $Q_{\text{п}}$ – часть теплоты, возникающая в резуль-

Рис.1. Количество тепла в изделии $Q_{\text{и}}$ инструмента $Q_{\text{р}}$ и стружке $Q_{\text{с}}$

тате теплообмена на площадке контакта передней поверхности инструмента со стружкой; $Q_{\text{тр}}$ – часть теплоты, возникающая в результате трения между резцом и стружкой.

Содержание исследования. Определение температуры в поверхностном слое от каждого объемного источника тепла (рис.2) связано с интегрированием следующих выражений [1]:

$$\theta_1 = \frac{q_1 \exp(-p)}{2\sqrt{\pi\lambda c\rho v}} \int_{\Delta_1}^{\Delta_1+\Delta_2} \exp\left(p \frac{x_1}{x_2}\right) \frac{dx_1}{\sqrt{x-x_2}} \int_0^{a_1} \exp\left[-\frac{p \operatorname{ctg}\beta_1 y_1}{\Delta_2} - \frac{v(y-y_1)^2}{4a(x-x_1)}\right] dy_1; \quad (1)$$

$$\theta_2 = \frac{q_2 \exp(-p)}{2\sqrt{\pi\lambda c\rho v}} \int_0^{\Delta_2} \exp\left(p \frac{x_2}{\Delta_2}\right) \frac{dx_1}{\sqrt{x-x_2}} \int_0^h \exp\left[-v \frac{(y-y_1)^2}{4a(x-x_2)}\right] dy_2; \quad (2)$$

$$\theta_3 = \frac{q_3 \exp(1 + \frac{\Delta_2}{\Delta})}{2\sqrt{\pi\lambda c\rho v}} \int_{\Delta_2}^{\Delta_2+\Delta} \frac{dx_3}{\sqrt{x-x_2}} \int_0^{h_1} \exp\left[-\frac{v(y-y_3)^2}{4a(x-x_3)}\right] dy_3 - \frac{q_3 \exp \frac{1}{\Delta}}{2\sqrt{\pi\lambda c\rho v}} \int_{\Delta_2}^{\Delta_2+\Delta} \frac{x_3 dx_3}{\sqrt{x-x_3}} \int_0^{h_1} \exp\left[-\frac{v(y-y_3)^2}{4a(x-x_3)}\right] dy_3, \quad (3)$$

Рис.2. Схема действия объемных источников тепла и распределения температуры в поверхностном слое детали при обработке

где θ_1 , θ_2 , θ_3 – температура в поверхностном слое от первого, второго и третьего источников тепла соответственно; v – скорость резания, м/с; λ – теплопроводность материала обрабатываемой заготовки, Вт/(м·К); $c\rho$ – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м³·К); a – температуропроводность материала обрабатываемой заготовки, м²/с; a_1 – толщина среза, м; h – размер источника тепла ANN_1A_1A вдоль оси y , м; h_1 – размер источника тепла $ДAA_2D_1D$ вдоль оси y , м; $p = 5$ – константа, характеризующая распределение интенсивности тепловыделения; β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига; x_1 и y_1 – координаты линейного источника, м.

ординаты линейного источника, м.

Исследования профессоров М.Ф.Полетики [4] и Н.В.Талантова [7] позволили А.Н.Резникову и С.С.Силину разработать расчетные схемы тепловых потоков в изделии, инструменте и стружке [5, 6], а также определить интенсивность их тепловыделения (рис.2).

Интенсивность тепловыделения при резании материалов в условной вершине режущего инструмента (точка A на рис.2) определяется по формуле

$$q_A = \tau_p v \cos\beta_1,$$

где q_A – интенсивность тепловыделения в условной вершине резца (в точке A), Дж/(м·с); τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па; β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига.

Интенсивность тепловыделения для первого, второго и третьего источников тепла (рис. 2) будет определяться по формулам:

$$q_1 = \frac{q_{AB} a_1}{\sin\beta_1} \frac{1}{\int_0^{\Delta_2} \int_0^h \exp\left[-p \left(1 - \frac{x_1 - y_1 \operatorname{ctg}\beta_1}{\Delta_2}\right)\right] dy_1 dx_1};$$

$$q_2 = \frac{q_{AB} a_1 \frac{1}{\sin \beta_1}}{\int_0^{\Delta_2} \int_0^h \exp \left[-p \left(1 - \frac{x}{\Delta_2} \right) \right] \exp \left[-p \frac{y}{h} \right] dy_2 dx_2};$$
$$q_3 = \frac{p}{1 - \exp(-p)} \frac{\tau_p v}{h_1}.$$

На основе расчетов по формулам (1)-(3) и обработки результатов расчета получена упрощенная формула для определения температуры в поверхностном слое детали [1]:

$$\left(\frac{\theta_m}{\theta_A} \right)_{OB} = R(BB)^{m-n_y} \left(\frac{h}{a_1} \right)^n \left(\frac{h_1}{h} \right)^K \left(\frac{\Delta}{\Delta_1} \right)^P \left(\frac{y}{h} \right)^{m_y} \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)^U,$$

где θ_m – температура в поверхностном слое детали на определенной глубине от поверхности, °С; θ_A – температура в условной вершине режущей части инструмента (в точке A), °С; y – глубина рассматриваемого слоя от поверхности, м; ρ_1 – радиус округления режущей кромки инструмента, м; $B = va_i/a$; $h = a_1 \left(\sqrt{\frac{1}{B^2} - 1} - 1 \right)$ – высота объемного источника тепла в зоне основных пластических деформаций (источника 2), м; $h_1 = \Delta/\sqrt{2}$ – высота объемного источника тепла в зоне контакта режущего инструмента с обработанной поверхностью (источник 3), м; $\Delta = \arccos \left[1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}} \right] + \frac{a_2 B^{1-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)}$ – протяженность теплового источника 3), м; γ – передний угол режущей части инструмента, градус; $\Delta_1 = a_1/B$ – проекция плоскости сдвига на направление перемещения режущего инструмента, м; $B = 1/\operatorname{tg} \beta_1$; $\Delta_2 = a_1/B\sqrt{2(1+B^2)} + 1$ – протяженность теплового источника тепла 2, м; $R, m, n_y, k, p, m_y, u, a_2, x_2, b_2$ – зависят от свойств обрабатываемого и инструментального материала (табл.1, 2).

Температура резания в условной вершине резца (точка A , рис.2) определяется по формуле [6]

$$\theta_A = \frac{\tau_p}{c\rho B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{BB}{4}}.$$

Расчетом может быть определена скорость резания при лезвийной обработке и оптимальная скорость резания, соответствующая оптимальной температуре резания, при которой наблюдается минимум износа режущего инструмента. Последнее явление было открыто и обосновано профессором А.Д.Макаровым.

Оптимальная скорость резания определяется по формуле [6]

$$v_0 = \frac{k^2 \lambda c \rho \sin^{0.2} \alpha \theta_0^2 / \tau_p^2}{4 a_1 c_0^2 (\rho_1/a_1)^{2(n_0-0.1)} (1-0.45 \sin \gamma) (b/b_1)^{0.8}} \times$$
$$\times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2,65 \lambda_p \beta \varepsilon (a_1/b_1)^{0.3} c_0 (\rho_1/a_1)^{2(n_0-0.1)} (1-0.45 \sin \gamma) (b/b_1)^{0.8} \tau_p}{k^2 \lambda c \rho \sin^{0.2} \alpha \theta_0}} \right]^2,$$

где b – длина контакта режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом, м; c_0 и k – величины, зависящие от сочетаний технологических условий обработки; θ_0 – оптимальная температура резания, °С.

Таблица 1

Значения коэффициента и показателей степени

Обозначение величин	Интервалы изменения y/h , h_1/h , BB , h/h_1 и Δ/Δ_1		Значения величин	
R	$\frac{y}{h} = 0$	$3,3 \left(\frac{h_1}{h} \right)^{0,123} \left(\frac{h}{a_1} \right)^x \left(\frac{\Delta}{\Delta_1} \right)^{0,466}$	$\frac{h}{a_1} \leq 0,6$	$\frac{h}{a_1} > 0,6$
			$x = 0,07$	$x = 0,625$
		$BB \leq 30$	$BB > 30$	
	$0 < \frac{y}{h} \leq 3$	$1,3(BB)^{-0,259}$	$3,2(BB)^{-0,543}$	
	$3 < \frac{y}{h} \leq 6$	$0,78 (BB)^{-0,176}$	$13,5(BB)^{-1}$	
	$6 < \frac{y}{h} \leq 9$	$0,27$	$70(BB)^{-0,664}$	
m	$\frac{h_1}{h} \leq 1$	$BB \leq 20$	$BB > 20$	
		$7(BB)^{-1,072}$	$0,62(BB)^{-0,268}$	
n	$\frac{h_1}{h} > 0,1$	$\frac{h}{a_1} \leq 0,8$	$0,22 \left(\frac{h}{a_1} \right)^{-0,306}$	
		$\frac{h}{a_1} > 0,8$	$0,2 \left(\frac{h}{a_1} \right)^{-0,675}$	
k	$0,1 < \frac{h_1}{h} \leq 0,7$	$\Delta/\Delta_1 \leq 0,5$	$h/a_1 \leq 1$	0
			$h/a_1 > 1$	$0,0036(BB)^{1,303}$
		$\Delta/\Delta_1 > 0,5$	$h/a_1 \leq 8$	$BB \leq 30$
	$h/h_1 > 0,7$		$BB > 30$	$0,38 (BB)^{-0,73}$
			$h/a_1 > 8$	0
				$-0,036(BB)$
p	$BB \leq 5$	$h/a_1 \leq 0,5$	$BB \leq 30$	$BB > 30$
			0	-0,14
		$h/a_1 > 0,5$	$-0,025(BB)^{0,74}$	-0,344
u	$\Delta_1/\Delta_2 \leq 0,5$	$-0,174$		$-0,0057(BB)$
		$-0,052$		
		$0,115(BB)^{0,23} (h/a_1)^{0,15} (BB)^{0,364}$		
n_y	$0 < y/h \leq 3$	$-0,2(h/a_1)^{0,8}$		
		$0,07(BB)^{0,48}$		
		$0,36$		
m_y	$y/h = 0$	$h_1/h < 0,1$	$1,24(BB)^{-0,16} \left(\frac{h_1}{h} \frac{\Delta}{\Delta_1} \right)^{0,23}$	
		$h_1/h \geq 0,1$	$(h/h_1)^{0,194} (h/a_1)^{0,3}$	
n_y	$0 < y/h \leq 3$	$2,4(BB)^{-0,158} \left(\frac{h_1}{h} \frac{\Delta}{\Delta_1} \right)^{0,061}$		
		0		
		$0,22$		
m_y	$y/h > 3$	1		
		0		
		$-0,23$		
m_y	$0 < y/h \leq 3$	$-0,57(BB)^{0,37}$		
		0		
		$-0,23$		

Таблица 2

Значения коэффициентов a_2 , x и b_2

Коэффициент	$B \leq 0,5$	$0,5 < B \leq 0,9$	$B > 0,9$
a_2	0,557	0,44	0,294
x	0,75	0,53	0,445
b_2	0,078	0,45	3,4

Установлено, что при оптимальной температуре резания обеспечивается не только минимум износа режущего инструмента, но и наиболее благоприятные параметры качества поверхностного слоя [1].

Результаты исследований позволили с более высокой степенью точности выполнять расчеты погрешностей обработки, обусловленных тепловым воздействием на режущий инструмент и обрабатываемую заготовку.

Погрешность детали, обусловленная нагревом режущего инструмента в процессе обработки, определяется по формуле

$$\Delta L_p = \frac{\beta_{ст} \theta_p}{2K} \left\{ \left(1 + 2 \sqrt{\frac{\alpha_1 \alpha_{cm} \tau}{\pi \lambda_{cm} h}} \right) \sqrt{\frac{\lambda_{cm} h}{\alpha_1}} \left[1 - \exp \left(-L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{cm} h}} \right) \right] - \right. \\ \left. - \frac{1}{\sqrt{\pi \alpha_{cm} \tau}} \left[-\frac{\lambda_{cm} h}{\alpha_1} \exp \left(-L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{cm} h}} \right) \left(L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{cm} h}} + 1 \right) + \frac{\lambda_{cm} h}{\alpha_1} \right] - \right. \\ \left. - \left(1 - 2 \sqrt{\frac{\alpha_1 \alpha_{cm} \tau}{\pi \lambda_{cm} h}} \right) \sqrt{\frac{\lambda_{cm} h}{\alpha_1}} \left[1 - \exp \left(-L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{cm} h}} \right) \right] - \frac{1}{\sqrt{\pi \lambda_{cm} h}} \times \right. \\ \left. \times \left[-\frac{\lambda_{cm} h}{\alpha_1} \exp \left(L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{cm} h}} \right) \left(L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{cm} h}} - 1 \right) + \frac{\lambda_{cm} h}{\alpha_1} \right] \right\},$$

где β_p – коэффициент температурного линейного расширения материала державки резца, $1/^\circ\text{C}$; L_p – длина вылета резца, м; θ_p – температура в зоне резания, $^\circ\text{C}$; $K = \pi^2/2\beta\epsilon$ – величина, учитывающая геометрию инструмента при несвободном резании; α_1 – коэффициент теплоотдачи материала державки резца в окружающую среду, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$; a_{cm} и λ_{cm} – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала державки резца, $\text{м}^2/\text{с}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; h – отношение площади сечения державки резца к его периметру, м; τ – время работы резца, с; β и ϵ – угол заострения и угол при вершине режущей части инструмента в плане, рад.

Значение θ_p определяется по формуле [2]

$$\theta_p = \frac{2\theta_N \sqrt{a_{cm} \tau}}{H \left[-E_i \left(-\frac{\Delta^2}{16a_{cm} \tau} \right) \right]} \left\{ \frac{H}{2\sqrt{a_{cm} \tau}} \left[-E_i \left(-\frac{H^2}{4\sqrt{a_{cm} \tau}} \right) \right] - \frac{\Delta}{4\sqrt{a_{cm} \tau}} \left[-E_i \left(-\frac{\Delta^2}{16a_{cm} \tau} \right) \right] + \right. \\ \left. + 2\pi \left(\operatorname{erf} \frac{H}{2\sqrt{a_{cm} \tau}} - \operatorname{erf} \frac{\Delta}{4\sqrt{a_{cm} \tau}} \right) \right\},$$

где H – высота державки резца; E_i – интегрально показательная функция Эйлера; erf – интеграл вероятностей; θ_N – максимальная температура на задней поверхности резца, определяемая по формуле С.С.Силина [6].

Температура в середине площадки контакта режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой определяется по формуле [5]

$$\theta_N = \theta_A \left(0,5 + \frac{0,36 \sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{BE}} + \frac{0,465 B^{1,275} B^{0,625} E^{0,55} \cos \alpha}{\Gamma^{0,25} D^{0,075} \sin^{0,275} \alpha \operatorname{erf} \sqrt{\frac{BB}{4}}} \right),$$

где $E = \rho_1/a_1$ – безразмерный комплекс, характеризующий влияние на процесс обработки геометрической формы режущей кромки резца; $D = a_1/b_1$ – безразмерный комплекс, характеризующий геометрию сечения резца; $\Gamma = (\lambda_p/\lambda_d)\beta\varepsilon$ – безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий влияние геометрии режущей части инструмента и отношение теплопроводности обрабатываемого и инструментального λ_p материалов; β и ε – угол заострения режущей кромки инструмента и угол при вершине резца в плане, радиан.

Погрешность обработки, обусловленная температурой деформацией обрабатываемой детали, определяется по формуле:

$$\Delta R = \frac{C\beta_d\theta_{\max}Fo^m}{0,5R_n + 1} \left(\frac{l}{S_m} \right)^n \left(R_n - \left(\frac{R_b}{R_n} \right)^{0,5R_n} R_b \right),$$

где β_d – коэффициент температурного линейного расширения материала обрабатываемой детали, $1/^\circ\text{C}$; R_n и R_b – наружный и внутренний радиусы обрабатываемых поверхностей, м; S_m – минутная подача режущего инструмента, м; l – длина теплового источника, движущегося по обрабатываемой поверхности, м; $Fo = a\tau/R_n$ – критерий Фурье; τ – время нагревания, $^\circ\text{C}$; C , m и n – величины, зависящие от значений минутной подачи режущего инструмента и критерия Фурье [1].

Заключение. Полученные расчетные зависимости для определения температуры в зоне резания и погрешностей обработки, обусловленных тепловым воздействием на обрабатываемую заготовку и режущий инструмент, позволяют прогнозировать их величину при технологической подготовке производства на основе назначения режимов резания и выбора марки режущей части инструмента и ее геометрических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
2. Красный В.А. Триботехнические характеристики деталей горных машин с регулярной микрогеометрической поверхности / В.А.Красный, В.В.Максаров // Металлообработка. 2016. № 1(91). С. 29-35.
3. Максаров В.В. Моделирование и управление динамическими свойствами технологических систем / В.В.Максаров, П.В.Леонидов // Записки Горного института. 2014. Т. 209. С. 71-77.
4. Полетика М.Ф. Теория резания. Ч. 1. Механика процесса резания. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2001. 202 с.
5. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
6. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
7. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.
8. Boothroyd G. Temperatures in Orthogonal Metal Cutting // Proc. Inst. Mech. Eng. 1963. Vol. 177. P. 789-810.
9. Maksarov V.V. Increasing the Effectiveness of the Cutting Process in the Course of Milling / V.V.Maksarov, Ju.Ju.Olt, M.M.Madisoo // Journal of Mechanics & Industry Research. 2013. Vol. 4. № 1. P. 75-81.
10. Maksarov V.V. Increase of wear resistance of friction down hole oil pumps with seals of directionally reinforced polymer composition materials / V.V.Maksarov, V.A.Krasnyy // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 1. P. 34-37.
11. Mathematical Modelling of Cutting Process System / Ju.Ju.Olt, O.O.Liivapuu, V.V.Maksarov, A.A.Liivapuu, T.T.Tärgla // Engineering, Mathematics I. Springer. Proceedings in Mathematics & Statistics. 2016. Vol. 178. P. 173-186.

Авторы: В.Ф.Безъязычный, д-р техн. наук, профессор, tehnology@rsatu.ru (Рыбинский государственный авиационный технологический университет имени П.А.Соловьева, Рыбинск, Россия), М.Счерек, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по науке и исследованиям, marian.szcerek@gmail.com (Институт экологически рациональных технологий Национального научно-исследовательского института, Радом, Польша).

Статья поступила в редакцию 7.02.2018.

Статья принята к публикации 6.04.2018.