

В.И. Свирщёв

Пермский государственный технический университет

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ДЕТАЛИ ПРИ КРУГЛОМ ТОРЦОВОМ ШЛИФОВАНИИ

Получено аналитическое выражение для расчета температурного поля в детали при многопроходном круглом торцовом шлифовании. Выполнен расчет максимальных значений температур в зоне контакта круга с деталью при конкретных конструктивных размерах инструмента и детали, характеристике инструмента, параметрах режима шлифования.

При круглом торцовом шлифовании зона контакта абразивного круга с деталью представляет собой криволинейный прямоугольник (рис. 1) длиной L и шириной $2h$. Причем ширина на порядок меньше, чем длина. В этом случае зону контакта целесообразно моделировать в виде бесконечно длинной полосы, через которую в обрабатываемую деталь поступает тепловой поток с равномерной плотностью [1]. В этом случае на шлифуемой поверхности могут быть заданы граничные условия второго рода: постоянный тепловой поток в зоне контакта и нулевой тепловой поток вне зоны контакта.

В соответствии с принятыми допущениями процесс кругового торцового шлифования при постановке тепловой задачи можно схематизировать следующим образом (рис. 1). По полупространству, теплофизические характеристики которого λ , c_v , со скоростью V_i в положительном направлении оси Z движется двухмерный источник тепла (2П1) шириной $2h$ и длиной L , плотность теплового потока которого q_0 равномерно распределена по площадке контакта. Требуется найти квазистационарное распределение температуры в поверхностном слое шлифуемой детали из решения дифференциального уравнения

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + V_i \frac{\partial \Theta}{\partial z} \quad (1)$$

при следующих начальных и граничных условиях:

$$\Theta|_{\tau=0} = 0; \quad -\lambda \left. \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right|_{x=0} = q_0; \quad \left. \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

$$\left. \begin{array}{l} -h \leq Z \leq h \\ -\infty \leq y \leq \infty \end{array} \right\}$$

где Θ – температура; τ – время; a – коэффициент температуропроводности; V_i – скорость источника на i -м радиусе детали; λ – коэффициент теплопроводности; q_0 – плотность теплового потока в зоне резания при шлифовании.

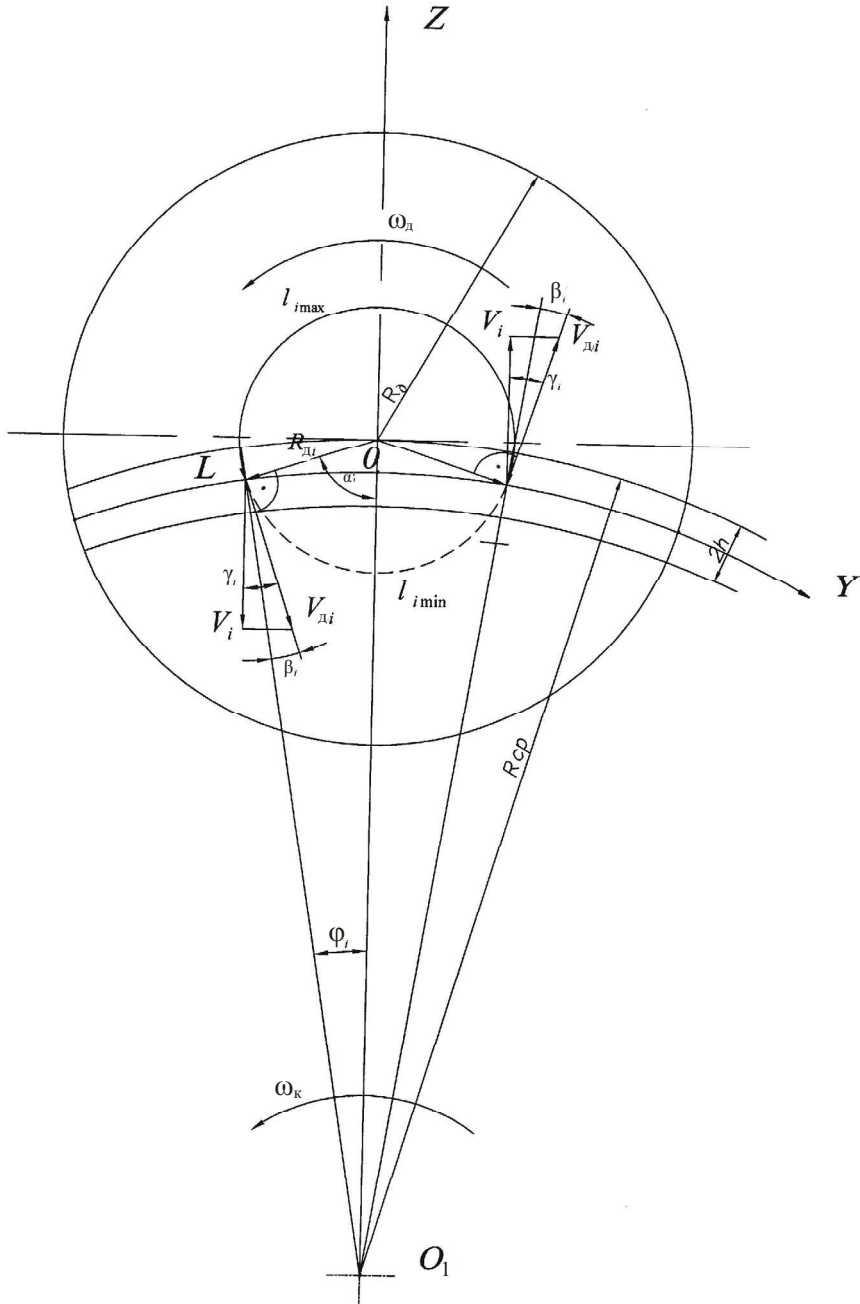


Рис. 1. Схема для расчета температурного поля

Согласно методу источников тепла [2] решение уравнения (1) в установившемся режиме шлифования для полосового источника (2П1) имеет вид

$$\Theta = \frac{2}{\lambda\sqrt{a}} \int_{-h}^h dz' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \int_0^{\infty} \frac{q_0 d\tau}{(4 \cdot \pi\tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{x^2 + (y-y')^2 + (z-z'+V_i\tau)^2}{4 \cdot a\tau}\right], \quad (2)$$

где x', y', z' – координата точки тела, в которой мгновенно выделилось количество тепла $dQ = q_0 dz' dy' d\tau$.

После интегрирования уравнения (2), с введением замены $V_i(z-z')/(2a) = \xi$ получим

$$\Theta = \frac{2 \cdot q_0 a}{\pi \lambda V_i} \int_{\frac{V_i(z-h)}{2a}}^{\frac{V_i(z+h)}{2a}} \exp(-\xi) K_0 \left[\frac{V_i \sqrt{x^2 + \frac{4a^2 \xi^2}{V_i^2}}}{2a} \right] d\xi, \quad (3)$$

где $K_0(m)$ – интегральное представление модифицированной функции Бесселя второго рода нулевого порядка.

Введем безразмерные координаты $X = \frac{V_i x}{2a}$, $Z = \frac{V_i z}{2a}$ и безразмерную полуширину теплового источника $H = \frac{V_i h}{2a}$, тогда выражение (3) примет вид

$$\Theta = \frac{2 \cdot q_0 a}{\pi \lambda V_i} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0 \left(\sqrt{X^2 + \xi^2} \right) d\xi. \quad (4)$$

Функция (4) описывает температурное поле от полосового источника шириной $2h$, движущегося по полубесконечной теплопроводящей среде, и имеет важное значение для расчета температурных полей при шлифовании. Для удобства проведения расчетов в справочной литературе приводятся значения интеграла в выражении (4) для определенного значения безразмерной координаты X .

Положив в уравнении (4) $X = 0$, получим выражение для расчета температуры на поверхности шлифуемой детали:

$$\Theta = \frac{2 \cdot q_0 a}{\pi \lambda V_i} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0(\xi) d\xi. \quad (5)$$

Для получения из аналитического расчета истинных значений температур, возникающих в контактной зоне при круглом торцовом шлифовании, необходимо определить величину плотности теплового потока q_0 , поступающего в шлифуемую деталь. Общую тепловую мощность, выделяющуюся в зоне контакта, можно определить из выражения $N = P_z V_k$.

Разделив эту величину на площадь S зоны контакта, можно найти полную плотность теплового потока в зоне шлифования: $q_1 = \frac{P_z V_k}{S}$. Доля тепла β , поступающая в деталь, может быть определена из выражения [2]

$$\beta = \frac{1}{1 + t \sqrt{\frac{2 \cdot V_i}{h a \pi}}},$$

где t – истинная глубина шлифования.

Таким образом, для аналитического расчета температуры плотность теплового потока, поступающего в деталь, может быть найдена из выражения

$$q_0 = q_1 \beta.$$

Полученные аналитические зависимости позволяют рассчитать температуру в каждой точке шлифуемой поверхности детали и температурное поле в нижележащих слоях на i -м радиусе шлифуемого торца.

Особенностью процесса круглого торцового шлифования является непостоянство его теплонапряженности в различных точках по радиусу шлифуемой детали R_{di} . Кроме того имеет место многократное повторение проходов, т.е. источник тепла, зона контакта шлифовального круга с изделием, встречается при своем движении с теплопроводящим пространством, предварительно нагретыми предыдущими проходами. В этом случае температурное поле будет представлять собой суперпозицию температурных полей многих источников, последовательно проходящих над данной точкой теплопроводящего пространства. В полученных выражениях (4) и (5) безразмерные координаты X , Z и безразмерная полуширина H теплового источника будут определяться по формулам (см. рис. 1):

$$X = \frac{V_{di} \cos \gamma_i \cdot x}{2a}, \quad Z = \frac{V_{di} \cos \gamma_i \cdot z}{2a}, \quad H = \frac{V_{di} \cos \gamma_i \cdot h}{2a},$$

где V_{di} – скорость детали, соответствующая среднему радиусу режущей ленточки круга.

Температурное поле будет определяться суммой интегралов (4) в виде

$$\Theta = \sum_{i=0}^n \frac{2aq_0}{\pi\lambda V_{ди} \cos \gamma_i} \int_{U_1}^{U_2} \exp(-\xi) K_0(\sqrt{X^2 \cos^2 \gamma_i + \xi^2}) d\xi, \quad (6)$$

где $U_1 = (Z - nL_0 + H) \cos \gamma_i$; $U_2 = (Z - nL_0 - H) \cos \gamma_i$; L_0 – безразмерная длина окружности; n – число проходов при съеме припуска.

Выражению (6) можно придать вид, приемлемый для инженерных расчетов [3]:

$$\Theta = \frac{2q_0 a}{\pi\lambda V_{ди} \cos \gamma_i} \left[\int_{(Z-H)\cos \gamma_i}^{(Z+H)\cos \gamma_i} \exp(-\xi) K_0(\sqrt{X^2 \cos^2 \gamma_i + \xi^2}) d\xi \right] + \frac{2q_0 a}{\pi\lambda V_{ди} \cos \gamma_i} \times \left[\sum_0^n \sqrt{2\pi} \left(\sqrt{|(Z_i - L_i \min(\max) - H_i) \cos \gamma_i|} - \sqrt{|(Z_i - L_i \min(\max) + H_i) \cos \gamma_i|} \right) \right]. \quad (7)$$

В выражении (7) первое слагаемое описывает температурное поле полосового источника тепла за единичный n -проход, а второе – накопившуюся остаточную температуру к началу n -прохода.

Применительно к нашему случаю длина безразмерной окружности L_0 разбита на две дуги $L_{i\max}$, $L_{i\min}$, следовательно, будет две остаточные температуры: на дуге $L_{i\min}$ (при n -четном проходе) и дуге $L_{i\max}$ (при n -нечетном проходе). Остаточная температура на дуге $L_{i\min}$

$$\Theta 1 = \frac{2q_0 a}{\pi\lambda V_{ди} \cos \gamma_i} \Theta 1_{\text{ост}}^*,$$

где $\Theta 1_{\text{ост}}^*$ – безразмерная остаточная температура.

$$\Theta 1_{\text{ост}}^* = \sqrt{2\pi} \left(\sqrt{|(Z_i - L_{i\min} - H_i) \cos \gamma_i|} - \sqrt{|(Z_i - L_{i\min} + H_i) \cos \gamma_i|} \right),$$

где Z_i – безразмерная координата на i -м радиусе; H_i – безразмерная полуширина теплового источника на i -м радиусе.

Остаточная температура на дуге $L_{i\max}$

$$\Theta 2 = \frac{2q_0 a}{\pi\lambda V_{ди} \cos \gamma_i} \Theta 2_{\text{ост}}^*,$$

где $\Theta 2_{\text{ост}}^*$ – безразмерная остаточная температура.

$$\Theta 2_{\text{ост}}^* = \sqrt{2\pi} \left(\sqrt{|(Z_i - L_{i\max} - H_i) \cos \gamma_i|} - \sqrt{|(Z_i - L_{i\max} + H_i) \cos \gamma_i|} \right).$$

$$L_{i\min, i\max} = \frac{V_{ди} l_{i\min, i\max}}{2a},$$

где $l_{i\min, i\max}$ определяются (см. рис. 1) на i -м радиусе детали, $l_{i\max} = 2R_{di}(\pi - \alpha_i)$, $l_{i\min} = 2R_{di}\alpha_i$, α_i – угол между i -м радиусом детали и осью Z ,

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{R_{di}^2 + R_{cp}^2 - (R_{cp} - h)^2}{2R_{di}R_{cp}} \right).$$

Угол γ_i , входящий в выражение (7), определяется по формуле

$$\gamma_i = \frac{\pi}{2} - \alpha_i = \arcsin \left(\frac{R_{di}^2 + R_{cp}^2 - (R_{cp} - h)^2}{2R_{di}R_{cp}} \right).$$

Таким образом, учитывая вышеизложенное, алгоритм расчета температуры из выражения (7) будет следующий:

1. На первом проходе безразмерная поверхностная температура ($X = 0$)

$$\Theta^* = \frac{\pi\lambda V_{di} \cos \gamma_i}{2q_0 a} \Theta = J[(Z_i + H_i) \cos \gamma_i] - J[(Z_i - H_i) \cos \gamma_i].$$

2. Остаточная безразмерная температура к началу второго прохода

$$\Theta_1^{\prime} = \sqrt{2\pi} \left(\sqrt{|(Z_i - L_{i\min} - H_i) \cos \gamma_i|} - \sqrt{|(Z_i - L_{i\min} + H_i) \cos \gamma_i|} \right).$$

Безразмерная температура в результате второго прохода: $\Theta_2^* = \Theta^* + \Theta_1^{\prime}$.

3. Остаточная безразмерная температура к началу третьего прохода

$$\Theta_2^{\prime} = \sqrt{2\pi} \left(\sqrt{|(Z_i - L_{i\max} - H_i) \cos \gamma_i|} - \sqrt{|(Z_i - L_{i\max} + H_i) \cos \gamma_i|} \right).$$

Безразмерная температура в результате третьего прохода:

$$\Theta_3^* = \Theta_2^* + \Theta_2^{\prime} \dots \text{ и т.д.}$$

Выполним расчет максимальных поверхностных температур по формуле (7) при следующих условиях круглого торцевого шлифования корпуса автомобильного гидротолкателя на станке Supfina-802: абразивный круг 6 65×50×20 25АМ28М111К; шлифуемый материал – сталь 15ХГЮА, $\lambda = 22,59$ Вт/(м·°С), $a = 5 \cdot 10^{-6}$ м²/с [1]; геометрические параметры зоны контакта инструмента с деталью $h = 1,875 \cdot 10^{-3}$ м, $S = 5,295 \cdot 10^{-5}$ м²; параметры режима шлифования $n_k = 2750$ об/мин, $n_d = 450$ об/мин, ступени осевой подачи инструмента ($V_{n1} = 10^{-5}$ м/с, $V_{n2} = 6 \cdot 10^{-6}$ м/с, $V_{n3} = 4 \cdot 10^{-6}$ м/с).

Расчет выполним для пяти фиксированных радиусов торца детали $R_{дi} = 2,92 \cdot 10^{-3}$; $5,84 \cdot 10^{-3}$; $8,76 \cdot 10^{-3}$; $11,68 \cdot 10^{-3}$; $14,6 \cdot 10^{-3}$ м. Расчет проведем для 21 оборота детали, за которое полностью снимается припуск при выполнении операции, со следующим распределением числа оборотов по осевым подачам ($V_{п1} - 6$ оборотов, $V_{п2} - 7$ оборотов, $V_{п3} - 8$ оборотов).

Расчетные исходные данные для оговоренных условий шлифования, полученные на основании экспериментального измерения силы резания P_z , приведены в табл. 1–2.

С использованием полученных исходных данных выполнен расчет максимальной поверхностной температуры по формуле (7) (рис. 2).

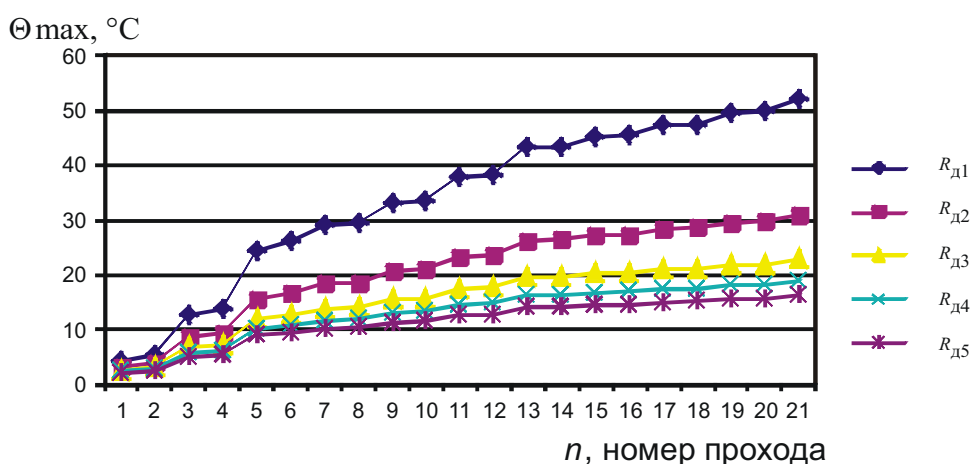


Рис. 2. Изменение максимальной поверхностной температуры для круга 25AM28M111K

Таблица 1

Интенсивность теплового потока q_0 (Вт/м²) по радиусам детали

$V_{пi}$, м/с	$R_{д1} = 2,92$ мм	$R_{д2} = 5,84$ мм	$R_{д3} = 8,76$ мм	$R_{д4} = 11,68$ мм	$R_{д5} = 14,6$ мм
Круг – 25AM28M111K					
$V_{п1} = 10^{-5}$	$2,612 \cdot 10^5$	$2,611 \cdot 10^5$	$2,611 \cdot 10^5$	$2,611 \cdot 10^5$	$2,61 \cdot 10^5$
$V_{п2} = 6 \cdot 10^{-6}$	$5,643 \cdot 10^4$	$5,642 \cdot 10^4$	$5,641 \cdot 10^4$	$5,641 \cdot 10^4$	$5,641 \cdot 10^4$
$V_{п3} = 4 \cdot 10^{-6}$	$1,672 \cdot 10^4$	$1,672 \cdot 10^4$	$1,672 \cdot 10^4$	$1,672 \cdot 10^4$	$1,672 \cdot 10^4$

Таблица 2

Расчетные значения γ_i , $V_{ди}$

$R_{ди}$, мм	2,92	5,84	8,76	11,68	14,6
γ_i , рад	0,737	0,425	0,368	0,367	0,388
$V_{ди}$, м/с	0,138	0,275	0,413	0,55	0,668

Полученные численные значения максимальных поверхностных температур не превышают предела теплостойкости стали 15ХГЮА [4], а следовательно, при выполнении операции круглого торцового шлифования для принятых технологических условий обработки не будет происходить изменение показателей исходного физико-механического состояния поверхностного слоя шлифуемых деталей.

Список литературы

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 228 с.
2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
3. Расчет температурного поля при многопроходном шлифовании торцом круга / В.А. Сипайлов [и др.] // Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: докл. конф. / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1972. – С. 139–143.
4. Журавлев В.Н. Машиностроительные стали. Справочник. – М.: Машиностроение, 1992. – 246 с.

Получено 1.07.2010