

**Ф.В. НОВИКОВ**, д-р техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков;  
**И.В. ГЕРШИКОВ**, директор ЗАО «Азовский машиностроительный завод», Бердянск

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛИФОВАНИЯ

Предложено упрощенное решение уравнения теплопроводности применительно к расчету температуры шлифования. Показано, что данное решение позволяет получить температуры, несущественно отличающиеся от значений, полученных на основе классического решения (расхождение в пределах 11%). Теоретически установлено, что основными путями уменьшения температуры шлифования являются снижение условного напряжения резания за счет повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне шлифования, а также применение многопроходного шлифования.

**Ключевые слова:** шлифовальный круг, обрабатываемая деталь, адиабатический стержень, температура шлифования, скорость детали.

**Введение и постановка задачи.** Повышение качества обработки деталей машин является важнейшим условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Поэтому актуальной проблемой для технологии машиностроения является снижение тепловой напряженности процесса шлифования, как одного из основных методов финишной обработки, ответственных за формирование параметров качества обрабатываемых поверхностей. Несмотря на большое количество работ в этом направлении [1 – 3], проблема бездефектной обработки при шлифовании в полной мере не решена: на обрабатываемых поверхностях образуются прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты, снижающие качество обработки. Это требует научно обоснованного выбора оптимальных режимов шлифования, характеристик шлифовальных кругов и других условий обработки, обеспечивающих снижение температуры шлифования. Иными словами, требуется исследование новых технологических возможностей снижения температуры шлифования. В связи с этим, в работе решается задача аналитического определения температуры шлифования и обоснования наиболее перспективных направлений ее уменьшения.

**Цель работы** – разработка теоретического подхода к определению температуры шлифования и условий ее уменьшения для обеспечения бездефектной обработки деталей машин.

**Математическая модель исследуемого процесса.** Для решения поставленной задачи рассмотрим расчетную схему процесса плоского шлифо-

вания, в которой снимаемый припуск представлен пакетом элементарных адиабатических стержней, которые в процессе обработки перерезаются шлифовальным кругом (рис. 1 [4]). Температура шлифования, исходя из такого представления процесса шлифования, определяется температурой, возникающей в момент выхода шлифовального круга из контакта с адиабатическим стержнем, т.е. в точке  $A$ . Время нагрева адиабатического стержня определяется временем его контакта с кругом. Следовательно, тепловая модель процесса шлифования может быть представлена так. На торец адиабатического стержня (в точке  $A$ ) в течение времени  $\tau$  действует тепловой поток плотностью  $q_0$ . В результате теплопроводности материала адиабатического стержня теплота распространится за это время на некоторую глубину, которую также как и температуру в точке  $A$  адиабатического стержня необходимо определить.

В работе [5] приведено аналитическое решение данной задачи (распределения температуры  $\theta$  вдоль полубесконечного адиабатического стержня), рассматривая уравнение теплопроводности в виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$\theta = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a^2 \cdot \tau}} - \frac{q_0}{\lambda} \cdot x \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}} \right) \right], \quad (2)$$

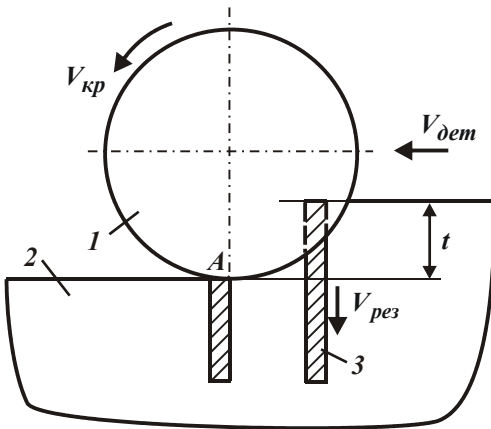


Рис. 1 – Расчетная схема параметров плоского шлифования: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – адиабатический стержень.

где  $a^2 = \lambda / c \cdot \rho$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ;  $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время обработки,  $\text{с}$ ;  $x$  – координата.

Недостатком данного решения является то, что на его основе нельзя установить конечное значение глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали  $\Delta x$  (теоретически она равняется беско-

нечности). В связи с этим, получим упрощенное решение, рассматривая уравнение (1) в виде:

$$\theta = a^2 \cdot \tau \cdot \frac{d^2 \theta}{dx^2}. \quad (3)$$

Такое упрощение возможно, поскольку при выводе дифференциального уравнения (1) первоначально было получено уравнение (3), а затем, принимая  $\tau \rightarrow 0$  получено уравнение (1).

Решение дифференциального уравнения (3) общеизвестно:

$$\theta = C_1 \cdot e^{\alpha \cdot x} + C_2 \cdot e^{-\alpha \cdot x}, \quad (4)$$

где  $\alpha = 1/(a \cdot \sqrt{\tau})$ .

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  определяются из граничных условий:

$$\begin{cases} \theta(x = \Delta x) = 0; \\ q(x = 0) = q_0. \end{cases} \quad (5)$$

Подчиняя зависимость (4) граничным условиям (5), с учетом равенства  $q = -\lambda \cdot d\theta/dx$  получены выражения для определения постоянных интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$  и, соответственно, температуры шлифования:

$$C_1 = -\frac{q_0}{\lambda \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{(1 + e^{2\alpha \cdot \Delta x})}; \quad C_2 = \frac{q_0}{\lambda \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{(1 + e^{-2\alpha \cdot \Delta x})};$$

$$\theta = \frac{q_0}{\lambda \cdot \alpha} \cdot \left[ \frac{e^{-\alpha \cdot x}}{(1 + e^{-2\alpha \cdot \Delta x})} - \frac{e^{\alpha \cdot x}}{(1 + e^{2\alpha \cdot \Delta x})} \right]. \quad (6)$$

Неизвестную величину  $\Delta x$  определим, подчиняя уравнение (6) граничному условию  $q(x = \Delta x) = 0$ . В результате получено следующее уравнение

$$\frac{1}{e^{\alpha \cdot \Delta x} \cdot (1 + e^{-2\alpha \cdot \Delta x})} = 0. \quad (7)$$

Очевидно, решением (7) является  $\Delta x = \infty$ . Следовательно, как и в решении (2), в данном случае нельзя определить конечное значение глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали  $\Delta x$ . С учетом условия  $\Delta x \rightarrow \infty$  зависимость (6) окончательно выразится так:

$$\theta = a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot e^{-\frac{x}{a \cdot \sqrt{\tau}}}. \quad (8)$$

Графически зависимости (2) и (8), преобразованные с учетом безразмерной величины  $z = x/(2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau})$  к виду

$$\theta = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-z^2} - z \cdot (1 - \operatorname{erf}z) \right]; \quad (9)$$

$$\theta = a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot e^{-2z}, \quad (10)$$

показаны на рис. 2 (при условии  $a \cdot \sqrt{\tau} \cdot q_0 / \lambda = 1$ ). Как видно, максимальные значения температуры шлифования  $\theta_{\max}$ , рассчитанные по зависимостям (9) и (10) при условии  $z = 0$  и соответственно  $x = 0$ , отличаются незначительно (в пределах 11%). Это указывает на то, что с достаточной для практики точностью расчеты  $\theta_{\max}$  можно производить как по зависимости (2), так и по зависимости (8), которая при условии  $x = 0$  выражается следующей формулой:

$$\theta_{\max} = a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda}. \quad (11)$$

**Анализ результатов моделирования.** Из зависимости (11) вытекает, что основными путями уменьшения максимальной температуры шлифования  $\theta_{\max}$  является уменьшение параметров  $q_0$  и  $\tau$ . Очевидно, плотность теплового потока  $q_0$  в большей степени влияет на  $\theta_{\max}$ , чем время контакта круга с обрабатываемой деталью  $\tau$ . Поэтому уменьшить  $\theta_{\max}$  можно, прежде всего, за счет уменьшения плотности теплового потока  $q_0$ , которая зависит от параметров режима шлифования. Если рассматривать параметры  $q_0$  и  $\tau$  не взаимосвязанными, что имеет место, например, при шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью, то, уменьшая  $\tau \rightarrow 0$ , можно добиться существенного снижения максимальной температуры шлифования  $\theta_{\max}$ . Это подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работе [1], согласно которым применение прерывистого шлифования позволяет до 2-х раз уменьшить температуру шлифования и, тем самым, повысить качество обработки без снижения производительности.

Рассмотрим случай шлифования, когда параметры  $q_0$  и  $\tau$  взаимосвязаны условиями режима резания. С учетом известных соотношений [6]:  $q_0 = \sigma \cdot V_{\text{рез}}$  и  $\tau = t / V_{\text{рез}}$  зависимость (11) представим в виде:

$$\theta_{\max} = \frac{a \cdot \sigma}{\lambda} \cdot \sqrt{t \cdot V_{\text{рез}}}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup> (энергоемкость обработки, Дж/м<sup>3</sup>);  $V_{\text{рез}}$  – скорость перерезания адиабатического стержня (рис. 1), м/с;  $t$  – глубина шлифования, м.

Согласно зависимости (12), уменьшить  $\theta_{\max}$  можно уменьшением параметров  $\sigma$ ,  $V_{рез}$  и  $t$ . Поскольку с уменьшением  $V_{рез}$  и  $t$  уменьшается производительность обработки (что неэффективно), то основным путем уменьшения  $\theta_{\max}$  является снижение условного напряжения резания  $\sigma$  за счет повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне шлифования.

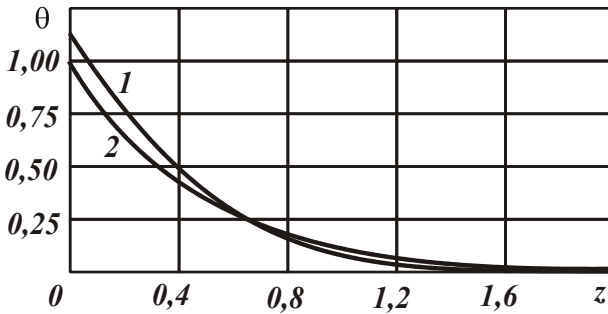


Рис. 2 – Зависимость  $\theta$  от  $z$ : 1 – расчет по зависимости (9); 2 – расчет по зависимости (10).

выразится так:

$$\theta_{\max} = \frac{a \cdot \sigma}{\lambda} \cdot \sqrt{Q_{y\partial} \cdot \sqrt{t / D_{кр}}} \quad (13)$$

Из зависимости (13) следует, что уменьшить температуру  $\theta_{\max}$  при обеспечении заданной удельной производительности обработки  $Q_{y\partial}$  можно уменьшением глубины шлифования и соответственно увеличением скорости детали, т.е. применением многопроходного шлифования.

**Выводы.** Предложено упрощенное решение уравнения теплопроводности применительно к расчету температуры шлифования. Показано, что данное решение позволяет получить значения температуры, незначительно отличающиеся от значений, полученных на основе классического решения (расхождение в пределах 11%). Это открывает новые возможности расчета и анализа по упрощенным зависимостям температуры шлифования, а также определения условий ее уменьшения.

Теоретически установлено, что основными путями уменьшения температуры шлифования являются снижение условного напряжения резания за счет повышения режущей способности круга и снижения интенсивности тре-

В работе [6] установлено соотношение:

$$V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{t / D_{кр}},$$

где  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $D_{кр}$  – диаметр круга, м. Тогда с учетом удельной производительности обработки  $Q_{y\partial} = t \cdot V_{дет}$

зависимость (12)

ния в зоне шлифования, а также применение многопроходного шлифования.

Показано, что основным недостатком полученного упрощенного решения, также как и классического решения, является невозможность определения конечной глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Это предполагает необходимость дальнейшего поиска новых решений в этом направлении.

**Список литературы:** 1. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с. 2. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. –127 с. 3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Чупров И.Ф. Уравнения математической физики с приложениями к задачам нефтедобычи и трубопроводного транспорта газа: Учебн. пособие / И.Ф. Чупров, Е.А. Канева, А.А. Мордвинов. – Ухта: УГТУ, 2004. – 128 с. 6. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Труды 13-й Междунар. научн.-техн. конф. Физические и компьютерные технологии. – Х.: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.

*Поступила в редколлегию 26.05.2013*

---

УДК 621.923

**Теоретический анализ температуры шлифования / Ф. В. Новиков, И. В. Гершиков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №37 (1010). – С. 119 – 124. Бібліогр.: 6 назв.**

Запропоновано спрощене рішення рівняння теплопровідності стосовно до розрахунку температури шліфування. Показано, що дане рішення дозволяє отримати температури, які незначно відрізняються від значень, отриманих на основі класичного рішення (розбіжність у межах 11%). Теоретично встановлено, що основними шляхами зменшення температури шліфування є зниження умовної напруги різання за рахунок підвищення ріжучої здатності круга й зниження інтенсивності тертя в зоні шліфування, а також застосування багатоходового шліфування.

**Ключові слова:** шліфувальний круг, оброблювана деталь, адіабатичний стержень, температура шліфування, швидкість деталі.

The paper proposed a simplified solution of the heat equation with respect to the calculation of the temperature of grinding. It is shown that this solution allows to obtain the values of temperature, slightly different from the values obtained on the basis of the classical solution (the difference between 11%). In theory, found that the main ways to reduce the temperature of grinding is to reduce the conditional-voltage cut by increasing the cutting capacity of the circle and reduce the intensity of the friction in the grinding zone, and the use of multi-pass grinding.

**Key words:** grinding wheel, the work piece, the adiabatic core, the temperature of grinding, the rate details.