



Ф.В. Новиков,

д.т.н., профессор, заведующий
кафедрой техники и технологии
Харьковского национального
экономического университета
имени Семена Кузнеця
e-mail: fokusnic1@rambler.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Ф.В. Новиков. Теоретический анализ технологических возможностей уменьшения температуры резания при шлифовании. В работе приведены упрощенные расчетные зависимости для определения температуры резания при шлифовании, позволяющие установить, в отличие от известных решений, конечные значения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Это открывает новые возможности определения оптимальных условий шлифования.

F.V. Novikov. Theoretical analysis of the technological opportunities to reduce cutting temperature during grinding. The paper presents a simplified calculation to determine the temperature dependence of cut for grinding for the determination, unlike known solutions, the final value of the penetration depth of heat into the surface layer of the workpiece. This opens up new possibilities determine the optimum grinding.

Введение. Повышение качества изготовления деталей машин является важным условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. В успешном решении этой задачи важная роль принадлежит совершенствованию процессов механической обработки деталей и в особенности процесса шлифования, который является основным методом финишной обработки и, как правило, предопределяет показатели качества обрабатываемых поверхностей [1]. В настоящее время накоплен большой опыт эффективного применения процессов шлифования. Значительный вклад в теорию и практику шлифования внес профессор Якимов А.В. [2]. Разработанная им теория теплофизики шлифования и высокоэффективный метод прерывистого шлифования позволили кардинально решить проблему бездефектной обработки деталей машин, в частности, высокоточных деталей авиационного назначения [3]. Вместе с тем, стремление к повышению производительности обработки и освоение новых образцов техники требуют постоянного совершенствования процесса шлифования. Для этого необходимо располагать новыми теоретиче-

скими решениями об условиях повышения качества и производительности обработки на основе снижения тепловой напряженности процесса шлифования, что требует дальнейшего развития теории теплофизики шлифования.

Материал и результаты исследования. Традиционно расчеты температуры резания при шлифовании θ производятся с использованием уравнения теплопроводности [2]:

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

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

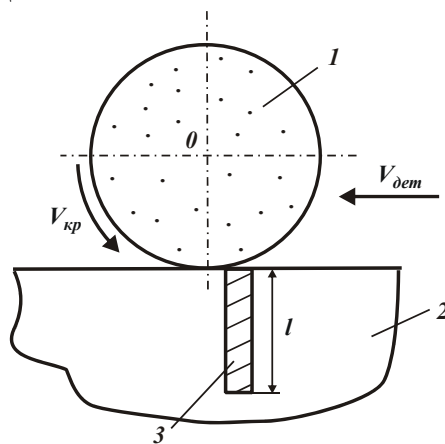


Рис. 1. Расчетная схема температуры плоского шлифования:
1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень

Решение этого уравнения, как правило, представляет значительные сложности. Поэтому в работе профессора Якимова А.В. [2] получено решение уравнения (1) на основе использования упрощенной расчетной схемы процесса шлифования (рис. 1), в которой шлифовальный круг движется вдоль обрабатываемой (плоской) поверхности, а обрабатываемая деталь представлена пакетом элементарных бесконечно тонких адиабатических стержней. В этом случае образующееся при шлифовании тепло распространяется лишь вдоль адиабатического стержня, т.е. в направлении оси координат x . Принимается, что стенки стержня изолированы, и теплообмен между ними не происходит. Тогда анализ тепловых процессов можно производить на основе упрощенного решения уравнения теплопроводности (для неустановившегося во времени теплового процесса) в одномерной системе координат:

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

Для расчета температуры резания при шлифовании приняты следующие начальные и краевые условия:

$$\theta(x, \tau)|_{\tau=0} = \theta_0; \quad \theta(x, \tau)|_{x=0} = \theta_u; \quad \left. \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

где θ_0 – начальная температура детали, равная температуре среды; θ_u – температура зоны контакта; τ – время действия теплового источника на торец выделенного элементарного стержня, с.

В итоге установлен характер распределения температуры по глубине обрабатываемого образца (элементарного стержня) в зоне шлифования с учетом времени воздействия источника теплоты на торец выделенного элементарного стержня $\tau = 2h / V_{dem}$ и плотности теплового потока q :

$$\theta_y = \frac{q}{2} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot h}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot V_{dem}}} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x \cdot \sqrt{V_{dem}}}{2 \cdot \sqrt{a^2 \cdot h}} \right) \right], \quad (4)$$

где $2h$ и V_{dem} – ширина и скорость перемещения источника теплоты.

Максимальная температура достигается на торце выделенного элементарного стержня, т.е. в месте контакта стержня с шлифовальным кругом. С увеличением координаты x температура θ_y непрерывно уменьшается. Уменьшить температуру в зоне шлифования можно за счет уменьшения плотности теплового потока q и времени действия теплового источника τ .

Аналогичное решение для граничного $\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{1}{\lambda} \cdot q$ и начального

$\theta|_{\tau=0} = 0$ условий получено в работе [4]:

$$\theta(z) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-z^2} - z \cdot (1 - \operatorname{erf} z) \right]; \quad (5)$$

$$q(z) = q \cdot (1 - \operatorname{erf} z), \quad (6)$$

где $z = \frac{x}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}}$; x – координата, м; τ – время, с.

Температура $\theta(z)$ и плотность теплового потока $q(z)$ по глубине поверхностного слоя обрабатываемого материала непрерывно уменьшаются, асимптотически приближаясь к нулевому значению (рис. 2). В этом случае глубина проникновения тепла в поверхностный слой материала бесконечна и поэтому нельзя однозначно определить истинное значение толщины нарушенного (дефектного с точки зрения теплового воздействия) слоя обрабатываемого материала. Поэтому для решения данной задачи в работе [5] предложен упрощенный подход к определению температуры шлифования, основанный на задании закона распределения плотности теплового потока по глубине поверхностного слоя обрабатываемого материала. Установлено, что для

случая $q(x) = q \cdot \left(1 - \frac{x}{\Delta x}\right)$ и граничного условия $\theta(x = \Delta x) = 0$ решение принимает вид

$$\theta(z) = 1,225 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot (1 - 0,816 \cdot z)^2; \quad (7)$$

$$q(z) = q \cdot (1 - 0,816 \cdot z), \quad (8)$$

где Δx – глубина проникновения тепла в поверхностный слой материала, м.

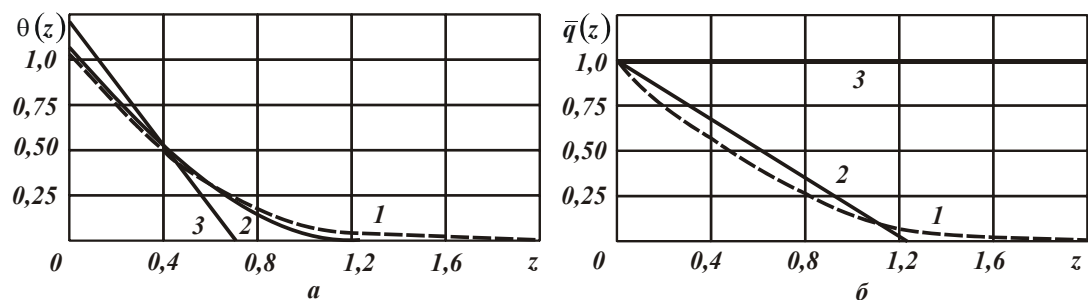


Рис. 2. Графики функций $\theta(z)$ (а) и $q(z)$ (б), описываемые зависимостями:

1 – (5) и (6); 2 – (7) и (8); 3 – (9) для условия $a \cdot \sqrt{\Delta \tau} \cdot q / \lambda = 1$

Для случая $q(x) = q$ получено:

$$\theta(z) = 1,414 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot (1 - 1,414 \cdot z). \quad (9)$$

Как установлено, значения максимальной температуры шлифования, полученные с использованием зависимостей (5), (7) и (9), отличаются в пределах 15% (рис. 2). Следовательно, с достаточной для практики точностью можно производить расчеты максимальной температуры шлифования и глубины проникновения тепла в поверхностный слой материала на основе предложенного упрощенного решения. На основе зависимости (7) аналитически описан характер изменения температуры шлифования с изменением числа прерываний процесса шлифования n :

$$\theta_0 = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Pi^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{n}{m^2} \cdot \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\tau_2^2}{\tau_1^2} \right)}; \quad (10)$$

$$\theta_{max} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\Pi^2}{m^2 \cdot \tau_1^2} \left(n \cdot \tau_1 - (n-1) \cdot \frac{2 \cdot \alpha^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_2^2 \right)}, \quad (11)$$

где σ – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м²; θ_0 , θ_{max} – температуры после действия n -го теплового импульса и охлаждения обрабатываемой детали, К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); Π – величина снимаемого припуска, м; m – количество разбиений припуска

на части; τ_1 – время действия теплового импульса, с; τ_2 – время охлаждения обрабатываемой детали, с.

Расчетами установлено, что с уменьшением времени τ_1 от 0,356 с до 0,089 с суммарное время обработки $\tau = m \cdot \tau_1 + (m-1) \cdot \tau_2$ уменьшилось от 1,43 с до 0,535 с для заданной максимальной температуры шлифования $\theta_{max} = 1000^\circ\text{C}$ (рис. 3). Исходные данные: $\sigma = 10^5 \text{ Н/мм}^2$; $\rho = 14,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $c = 40 \text{ кал/(кг}\cdot\text{град)}$; $\lambda = 14 \text{ кал/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{град)}$; $\alpha = 10^4 \text{ кал/(м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{град)}$; $\Pi = 0,1 \text{ мм}$;

$$m=4; \tau_2 = \sqrt{\frac{\tau_1 \cdot (4 - 11,236 \cdot \tau_1)}{75}}.$$

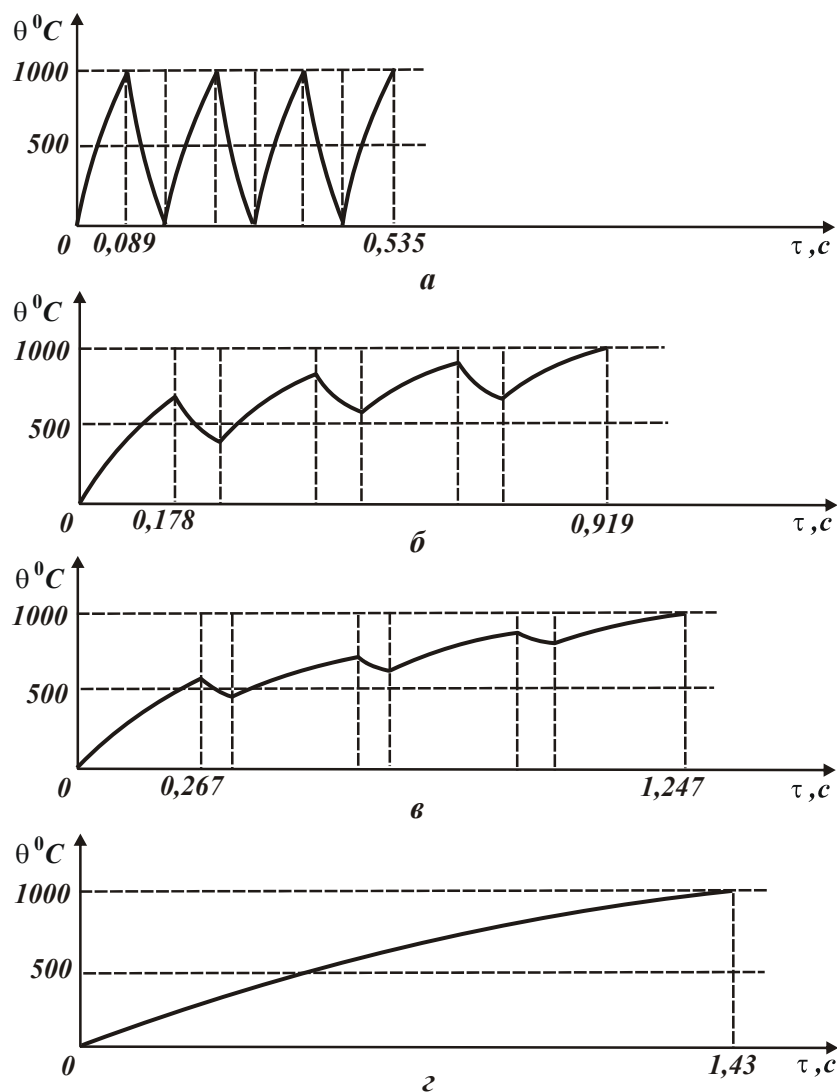


Рис. 3. Характер изменения температуры шлифования θ от времени обработки τ : а – $\tau_1=0,089$ с; б – $\tau_1=0,178$ с; в – $\tau_1=0,267$ с; г – $\tau_1=0,356$ с

Из рис. 3 также следует, что при условии $\tau_1=0,089$ с происходит полное охлаждение обрабатываемой детали в момент прерывания процесса шлифования, а при $\tau_1>0,089$ с – неполное охлаждение. Поэтому добиться наибольшего эффекта обработки можно в случае $\tau_1=0,089$ с.

Из зависимости (10) вытекают три основных условия уменьшения температуры θ_0 . Первое условие состоит в уменьшении энергоемкости обработки σ , второе – в увеличении m , а третье – в обеспечении равенства слагаемых подкоренного выражения. Реализация третьего случая предполагает стабилизацию во времени (с увеличением n) максимального значения температуры θ_{max} (рис. 3,а) за счет применения прерывистого шлифования или осуществления возвратно-поступательных движений круга и обрабатываемой детали.

В работе [6], аналогично выше приведенным решениям, получены приближенные зависимости для расчета максимальной температуры шлифования θ , глубины l_2 и скорости V_θ распространения тепла вглубь поверхностного слоя:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{\lambda \cdot c \cdot \rho}}; \quad l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}; \quad V_\theta = \frac{dl_2}{d\tau} = \sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \tau}}.$$

Как видно, основными условиями уменьшения максимальной температуры резания при шлифовании θ являются уменьшение плотности теплового потока q и времени его действия τ на фиксированную точку обрабатываемой поверхности, а уменьшение глубины l_2 проникновения тепла – уменьшение время τ . Это достигается снижением силовой напряженности процесса шлифования (за счет повышения режущей способности круга и снижения трения в зоне шлифования) и применением прерывистого шлифования. Уменьшить время τ можно также за счет увеличения скорости перемещения источника теплоты $V_{дем}$ (рис. 1), осуществляя многопроходное шлифование. Применение глубинного шлифования, осуществляемого с небольшой скоростью $V_{дем}$, предполагает увеличение времени τ . Поэтому добиться уменьшения температуры резания при шлифовании θ в этом случае можно уменьшением плотности теплового потока q за счет применения высокопористых абразивных кругов, обеспечивающих снижение интенсивности трения в зоне резания.

Выводы. В работе приведены упрощенные расчетные зависимости для определения температуры резания при шлифовании, с помощью которых можно установить конечные значения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Это позволяет по-новому подходить к определению оптимальных условий шлифования, поскольку в известных зависимостях характер распространения температуры вглубь поверхностного слоя детали подчиняется экспоненциальному закону, что исключает

возможности установления конечных (истинных) значений глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали и ограничивает однозначность выбора оптимальных режимов шлифования и характеристик круга.

Литература

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с.
4. Чупров И.Ф. Уравнения математической физики с приложениями к задачам нефтедобычи и трубопроводного транспорта газа: учеб. пособие / И.Ф. Чупров, Е.А. Канева, А.А. Мордвинов. – Ухта: УГТУ, 2004. – 128 с.
5. Новиков Ф.В. Расчет температуры шлифования с учетом неустановившегося во времени теплового процесса / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков, В.И. Полянский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – Курск: ЮЗГУ, 2014. – №1. – С. 34-38.
6. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.