

## РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА И ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Яценко С.М.**

*(Харьковский Национальный экономический университет)*

*В работе на основе уравнения теплового баланса при шлифовании, произведен расчет и анализ температуры резания, обоснованы основные пути ее уменьшения.*

В большинстве случаев на практике процесс шлифования используется на операциях получистовой обработки для формирования параметров качества и точности к последующим операциям чистой обработки [1]. К нему предъявляются высокие требования по обеспечению точности размера и шероховатости обработки, исключению температурных и механических дефектов поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Наиболее распространенным недостатком шлифования является появление прижогов на обрабатываемой поверхности, особенно при обработке материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

Существует множество способов их устранения [2, 3]. Вместе с тем, не изучив обстоятельно физику тепловых процессов при шлифовании, трудно кардинально решить проблему исключения температурных дефектов обработки. Поэтому целью настоящей работы является теоретический анализ теплового баланса и температуры резания при шлифовании.

При расчете теплового баланса при плоском шлифовании первоначально предположим, что вся работа резания  $N \cdot \tau$  затрачивается на нагревание образующихся стружек  $c \cdot m \cdot \theta$ , т.е.

$$N \cdot \tau = c \cdot m \cdot \theta, \quad (1)$$

где  $N = P_z \cdot V_{кр}$  – мощность теплового источника (мощность шлифования), Вт;  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $\tau$  – время шлифования, с;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $m$  – масса образующихся стружек, кг;  $\theta$  – температура резания при шлифовании, К.

Тангенциальную составляющую силы резания  $P_z$  представим в виде [4]:

$$P_z = \sigma \cdot S_{сум} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}} = \sigma \cdot \frac{B \cdot t \cdot V_{дет}}{V_{кр}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{сум}$  – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м<sup>2</sup>;  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $B$  – ширина шлифования (ширина круга), м;  $t$  – глубина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с.

Массу образующихся стружек  $m$  выразим:

$$m = \rho_m \cdot V = \rho_m \cdot B \cdot t \cdot V_{дет} \cdot \tau, \quad (3)$$

где  $\rho_m$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем образующихся стружек (объем снятого материала), м<sup>3</sup>.

Тогда из уравнения теплового баланса (1) следует:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m}. \quad (4)$$

Из зависимости (4) вытекает, что температура резания  $\theta$  однозначно зависит от условного напряжения резания  $\sigma$ , которое является обобщенным параметром процесса и определяется режимом шлифования, режущей способностью шлифовального круга, характеристиками обрабатываемого материала, трением круга с обрабатываемым материалом и т.д. Все факторы, способствующие снижению  $\sigma$ , также способствуют снижению температуры резания  $\theta$ .

Проведем численный расчет температуры резания  $\theta$  применительно к плоскому алмазному шлифованию твердого сплава ВК8. Исходные данные:  $c = 175,9$  Дж/(кг·К);  $\rho_m = 15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Предел прочности на сжатие твердого сплава ВК8 равен  $\sigma_{сж} = 4 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>.

Условное напряжение резания  $\sigma$  получим из соотношения [4]:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{ш}}, \quad (5)$$

где  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования;  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м<sup>2</sup>.

При шлифовании коэффициент шлифования  $K_{ш}$  изменяется в пределах: от коэффициента трения круга с обрабатываемым материалом  $f$  до 1. Тогда, исходя из зависимости (5), условное напряжение резания  $\sigma$  будет принимать значения, превышающие  $2 \cdot \sigma_{сж}$ . Например, по экспериментальным данным, приведенным в работе [4, 5], условное напряжение резания  $\sigma$  может быть больше предела прочности обрабатываемого материала на сжатие  $\sigma_{сж}$  в 20 и более раз.

Принимая в первом приближении  $K_{ш} = 0,5$ , и используя зависимость (5), получено:  $\theta = 6064$  К. Как видим, полученное значение температуры резания при шлифовании  $\theta$  существенно превышает значения температуры шлифования, достигаемые на практике (в пределах 1000°C). Такое высокое значение температуры  $\theta$  может быть связано с тем, что при расчете не учитывалось количество тепла, затрачиваемое на нагревание поверхностных слоев обрабатываемого материала заготовки и на нагревание шлифовального круга, в данном случае алмазного круга на металлической связке. Поэтому при составлении уравнения теплового баланса учтем тепло, затрачиваемое на нагревание образующихся стружек массой  $m$  и на нагревание поверхностного слоя обрабатываемого материала толщиной  $l_2$  вследствие его теплопроводности.

Как показано в работе [6], толщина  $l_2$  определяется зависимостью:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta\tau \cdot \lambda}{c \cdot \rho_m}}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $\Delta\tau$  – время, за которое обрабатываемая деталь, движущаяся со скоростью  $V_{dem}$ , переместится на величину, равную длине контакта круга с обрабатываемым материалом  $h = \sqrt{D_{кр} \cdot t}$ , тогда  $\Delta\tau = \sqrt{D_{кр} \cdot t} / V_{dem}$ , где  $D_{кр}$  – диаметр круга, м.

Уравнение теплового баланса с учетом нагревания образующихся стружек и поверхностного слоя обрабатываемого материала толщиной  $l_2$  примет вид:

$$N \cdot \tau = c \cdot \rho_m \cdot B \cdot t \cdot V_{dem} \cdot \tau \cdot \theta + 0,5 \cdot c \cdot \rho_m \cdot B \cdot l_2 \cdot V_{dem} \cdot \tau \cdot \theta. \quad (7)$$

Коэффициент 0,5 во втором слагаемом правой части уравнения введен для того, чтобы учесть неравномерность нагрева поверхностного слоя обрабатываемого материала по толщине  $l_2$ , т.к. температура изменяется от значения  $\theta$  до нуля. Тогда среднее значение температуры будет равно  $0,5 \cdot \theta$ .

С учетом выражения  $N = P_z \cdot V_{кр}$ , зависимости (2) и уравнения (7), температура резания при шлифовании  $\theta$  определится:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot \frac{t}{(t + 0,5 \cdot l_2)} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{l_2}{2t}\right)}. \quad (8)$$

По данным численных расчетов, приведенных в работе [6],  $l_2 > t$ . Например, для  $t = 0,01$  мм параметр  $l_2 = 0,255$  мм; для  $t = 1$  мм параметр  $l_2 = 8,1$  мм (при фиксированной удельной производительности обработки  $Q_{y\partial} = t \cdot V_{dem} = 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с), т.е. параметр  $l_2$  больше глубины шлифования  $t$  в 8,1...25,5 раз. Поэтому в первом приближении можно принять  $(t + l_2) \approx l_2$ . Тогда зависимость (8) выразится:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot \frac{2 \cdot t}{l_2}. \quad (9)$$

Наличие в зависимости (9) множителя  $t/l_2 \ll 1$  позволяет существенно уменьшить сравнительно большое значение  $\theta = 10107$  К, рассчитанное выше, и приблизить теорию к практике шлифования. Так, уменьшая установленное по зависимости (4) значение  $\theta = 6064$  К в 8,1...25,5 раз, имеем  $\theta = (475,6...1497)$  К, что хорошо согласуется с практикой шлифования.

Выразим в зависимости (9) параметр  $l_2$  зависимостью (6):

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \rho_m}{\lambda} \cdot \frac{V_{dem}}{\sqrt{D_{кр} \cdot t}}} = \sigma \cdot t^{0,75} \cdot \left( \frac{2 \cdot V_{dem}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \sqrt{D_{кр}}} \right)^{0,5}. \quad (10)$$

Как следует из полученной зависимости (10), наибольшее влияние на температуру резания оказывает условное напряжение резания  $\sigma$ . Затем, в порядке убывания, глубина шлифования  $t$  и скорость детали  $V_{dem}$ .

С увеличением глубины шлифования  $t$  температура резания  $\theta$  увеличивается по закону  $t^{0,75}$ . Однако такой характер изменения  $\theta$  будет справедлив при изменении глубины шлифования  $t$  до определенного значения, близкого к

значению  $t=0,5 \cdot l_2$ . При значениях  $t$ , соизмеримых со значением  $0,5 \cdot l_2$  и превышающих его, справедлива зависимость (8) и температура резания  $\theta$  будет не существенно увеличиваться с увеличением глубины шлифования  $t$ , приближаясь к значению  $\sigma / (c \cdot \rho_m)$ , рис. 1. Приблизительно по такому же закону будет изменяться температура резания  $\theta$  с увеличением скорости детали  $V_{дет}$ .

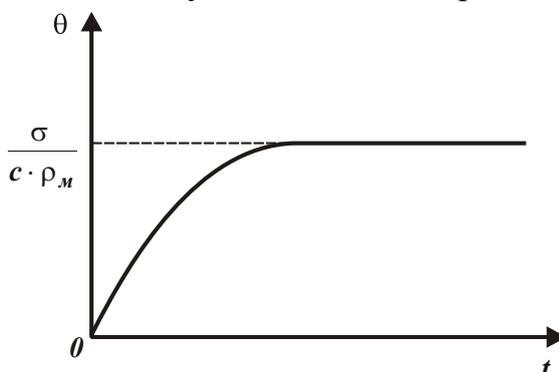


Рис. 1. Примерная зависимость температуры резания при шлифовании  $\theta$  от глубины шлифования  $t$ .

Определить количество тепла, которое уходит на нагревание алмазного круга на металлической связке, можно следующим образом. Представим рабочую поверхность круга в виде множества адиабатических прямолинейных стержней, расположенных по нормали к рабочей поверхности круга. Тогда толщина (или длина) части стержня  $l_2$ , в которой будет концентрироваться тепло, можно определить по зависимости (6), рассматривая в ней  $\Delta\tau = h / V_{кр} = \sqrt{D_{кр} \cdot t} / V_{кр}$ , рис. 2.

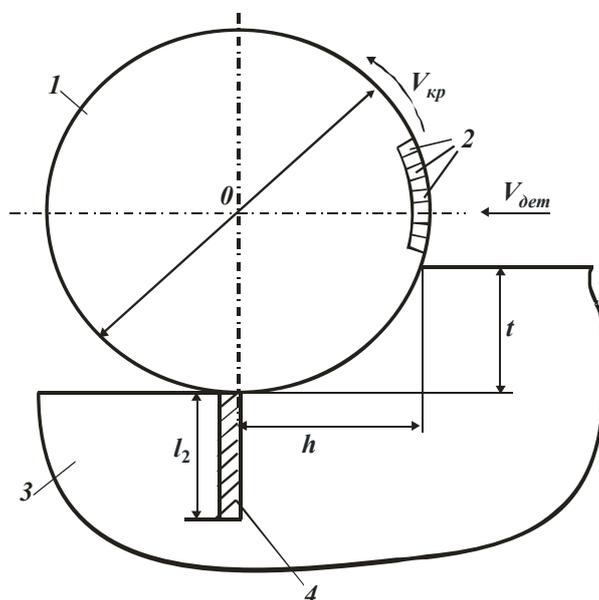


Рис. 2. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – адиабатические стержни поверхностного слоя круга; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – адиабатический стержень поверхностного слоя детали.

Учитывая, что  $V_{кр} \gg V_{дет}$ , значение  $\Delta\tau$ , рассчитанное по данной зависимости для круга, будет значительно меньше аналогичного значения

$\Delta\tau = \sqrt{D_{кр} \cdot t} / V_{дет}$  для детали. Следовательно, толщина прогретого слоя детали  $l_2$  будет значительно больше толщины прогретого слоя алмазного круга. Соответственно количество тепла, затрачиваемого на нагревание поверхностного слоя детали, будет больше количества тепла, затрачиваемого на нагревание поверхностного слоя алмазного круга и которое в первом приближении можно не учитывать при расчете температуры резания при шлифовании. Исходя из этого, в качестве расчетной зависимости для определения температуры резания при шлифовании  $\theta$  можно использовать зависимость (10).

Таким образом, в работе произведен расчет и анализ температуры резания при шлифовании на основе решения уравнения теплового баланса, составленного с учетом нагревания массы образующихся стружек (снятого материала) и поверхностного слоя обрабатываемого материала заготовки. Обоснованы основные пути уменьшения температуры резания при шлифовании.

#### Список литературы

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
3. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
6. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке. – Труды 11-й Международной научно-технической конференции „Физические и компьютерные технологии”, 2-3 июня 2005. – Харьков: ХНПК „ФЭД”, 2005.