

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

При резании и шлифовании труднообрабатываемых материалов постоянно возникают вопросы снижения тепловой напряженности процесса обработки. Это связано, во-первых, с необходимостью повышения стойкости режущего инструмента, обусловленной температурным фактором, во-вторых, с необходимостью повышения качества обработки, т.к. вследствие высоких температур резания на обрабатываемых поверхностях образуются прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты. В особой мере это относится к процессам шлифования, которые, с одной стороны, обеспечивают высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, а с другой стороны, в результате высокой тепловой напряженности процесса приводят к снижению качества обработки. Это относится к обработке таких материалов как твердые сплавы, высокопрочные стали, наплавочные материалы и т.д. Поэтому изыскание путей снижения тепловой напряженности процессов механической обработки имеет важное практическое значение и требует проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Проблеме определения условий уменьшения температуры при механической обработке в научно-технической литературе уделено большое внимание [1-4]. Разработаны основы теплофизики резания и шлифования материалов, разработаны эффективные методы, обеспечивающие снижение тепловой напряженности процессов механической обработки. Вместе с тем, в настоящее время отсутствуют простые и надежные инженерные методики расчета температуры резания, позволяющие с единых позиций обоснованно подойти к выбору наиболее рациональных методов и условий механической обработки по температурному критерию. В связи с этим, представляется актуальным решение задачи по разработке общего теоретического подхода к определению теплового баланса и температуры при механической обработке. Это позволит произвести сопоставимые сравнения различных методов механической обработки и оценить их технологические возможности в плане снижения температуры резания.

Цель статьи – теоретическое обоснование условий уменьшения температуры при механической обработке деталей машин.

В общем случае среднюю температуру резания  $\theta$  можно определить из условия равенства количества тепла  $Q = c \cdot m \cdot \theta$ , образующегося при резании, и работы резания  $A = P_z \cdot L$ :

$$\theta = \frac{P_z \cdot L}{c \cdot m}, \quad (1)$$

где  $P_z = \sigma \cdot S_{\text{срез}}$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $\sigma$  – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м<sup>2</sup>;  $S_{\text{срез}}$  – площадь поперечного сечения среза (резцом), м<sup>2</sup>;  $L$  – длина резания, м;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $m = \rho \cdot \mathcal{G} = \rho \cdot S_{\text{срез}} \cdot L$  – масса снятого материала (масса образующейся стружки), кг;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathcal{G}$  – объем снятого материала, м<sup>3</sup>.

После преобразования зависимости (1) имеем

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}. \quad (2)$$

В работе [5] получена аналитическая зависимость для определения  $\sigma$  при точении:

$$\sigma = 2 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot \text{tg}(\psi - \gamma), \quad (3)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\psi$  – условный угол трения на передней поверхности резца ( $tg \psi = f$  – коэффициент трения);  $\gamma$  – положительный передний угол резца.

Подставляя зависимость (3) в (2), получим

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot tg(\psi - \gamma)}{c \cdot \rho}. \quad (4)$$

Согласно зависимости (4), уменьшить температуру резания  $\theta$  можно уменьшением разности углов  $(\psi - \gamma)$ . Чем больше условный угол трения  $\psi$ , тем больше должен быть положительный передний угол резца  $\gamma$ . В случае шлифования угол  $\gamma$  принимает отрицательные значения, и зависимость (4) преобразуется:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot tg(\psi + \gamma)}{c \cdot \rho}. \quad (5)$$

В данном случае уменьшить температуру резания  $\theta$  можно однозначно уменьшением углов  $\psi$  и  $\gamma \rightarrow 0$ . Очевидно, при шлифовании условное напряжение резания  $\sigma$  и температура резания  $\theta$  всегда больше, чем при точении. Этому также способствует присутствие при шлифовании трения связки круга с обрабатываемым материалом, которое не учтено в зависимости (5), но которое по интенсивности может превышать силовую напряженность процесса резания абразивными зернами круга, определяемую зависимостью (5). Поэтому уменьшить параметры  $\sigma$  и  $\theta$  при шлифовании можно за счет поддержания высокой режущей способности круга, обеспечивая, в первую очередь, снижение трения связки круга с обрабатываемым материалом. Это достигается различными методами, например, применением эффективных технологических сред, применением высокопористых абразивных кругов, характеризующихся значительным объемом межзеренного пространства круга, достаточным для свободного вмещения образующихся при шлифовании стружек. При шлифовании алмазными кругами на высокопрочных металлических связках эффективно использовать электроэрозионную или электрохимическую правку круга, обеспечивая интенсивное термическое разрушение (или химическое растворение) металлической связки и поддержание на круте развитого режущего рельефа, что способствует высокопроизводительной и высококачественной обработке без образования на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов.

Необходимо отметить, что в расчетной зависимости (1) не учтен теплоотвод из зоны шлифования в поверхностный слой обрабатываемой детали. Поэтому уточним полученное решение, для чего количество тепла, образующегося в процессе шлифования, рассмотрим в виде двух составляющих, обусловленных отводом тепла из зоны резания в поверхностный слой обрабатываемой детали ( $Q_1$ ) и нагреванием стружек ( $Q_2$ ):

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (6)$$

Принимая (из курса физики)  $Q_1 = \lambda \cdot F \cdot \frac{\theta}{l_2} \cdot \tau$  и  $Q_2 = Q - Q_1 = c \cdot m \cdot \theta$ , из условия

равенства температур на поверхности обрабатываемой детали получим

$$\theta = \frac{(Q - Q_1)}{c \cdot m} = \frac{Q_1 \cdot l_2}{\lambda \cdot F \cdot \tau}, \quad (7)$$

где  $l_2$  – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К);  $F$  – площадь контакта режущего инструмента (шлифовального круга) с обрабатываемой поверхностью, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время контакта фиксированной точки, расположенной на обрабатываемой поверхности, с режущим инструментом, с.

Параметр  $l_2$  определяется аналитической зависимостью [6]:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}. \quad (8)$$

Массу образующихся стружек  $m$  представим в виде:

$$m = \rho \cdot t \cdot F, \quad (9)$$

где  $t$  – глубина шлифования, м.

Разрешая уравнение (7) относительно неизвестной величины  $Q_1$  с учетом зависимостей (8) и (9), получим

$$Q_1 = \frac{Q}{\left(1 + t \cdot \sqrt{\frac{2}{a \cdot \tau}}\right)}, \quad (10)$$

где  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Как видно, количество тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, меньше общего количества тепла, образующегося при шлифовании, в  $\left(1 + t \cdot \sqrt{\frac{2}{a \cdot \tau}}\right)$  раз. Для количественной оценки отношения  $Q_1 / Q$  в зависимости (10) будем рассматривать отношение  $t / \tau$  как скорость съема металла в радиальном направлении  $V_{рез}$ , т.е.  $V_{рез} = t / \tau$ . Тогда зависимость (10) выразится

$$Q_1 = \frac{Q}{\left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot V_{рез}}{a}}\right)}. \quad (11)$$

В работе [7] установлено, что при плоском шлифовании

$$V_{рез} = V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}} = \frac{Q_{уд}}{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}, \quad (12)$$

где  $V_{дем}$  – скорость перемещения детали, м/с;  $R_{кр}$  – радиус круга, м;  $Q_{уд} = V_{дем} \cdot t$  – удельная производительность обработки,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Определим отношение  $Q_1 / Q$  при плоском глубинном ( $t_1 = 10^{-3}$  м) и многопроходном ( $t_2 = 0,01 \cdot 10^{-3}$  м) шлифовании стали ШХ15 для исходных данных:  $R_{кр} = 0,15$  м;  $Q_{уд} = 600 \text{ мм}^2/\text{мин} = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $a = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Установлено, что при плоском глубинном шлифовании  $V_{рез} = 0,58 \cdot 10^{-3}$  м/с. Тогда рассчитанное по зависимости (11) отношение  $Q_1 / Q = 0,73$ . Следовательно, фактически все тепло, выделяющееся при шлифовании, уходит в обрабатываемую деталь. В образующиеся стружки уходит незначительная часть тепла.

Расчетами установлено, что при плоском многопроходном шлифовании  $V_{рез} = 5,8 \cdot 10^{-3}$  м/с. Тогда, согласно зависимости (11), отношение  $Q_1 / Q = 0,9$ . Как видно, при многопроходном шлифовании количество тепла, уходящего в образующиеся стружки, еще меньше, т.е. еще больше тепла уходит в обрабатываемую деталь. Поэтому при шлифовании с достаточной для практики точностью можно в первом приближении пренебречь количеством тепла, уходящим в образующиеся стружки ( $Q_2$ ), считая, что  $Q \approx Q_1$ . Из этого вытекает, что в данном случае расчет температуры резания можно производить по зависимости (7), рассматривая в ней  $Q_1 = Q$ :

$$\theta = \frac{Q \cdot l_2}{\lambda \cdot F \cdot \tau}. \quad (13)$$

Представим общее количество тепла, образующееся при шлифовании, в виде:  $Q = N \cdot \tau$ , где  $N = P_z \cdot V_{кр}$  – мощность шлифования, Вт;  $V_{кр}$  – скорость круга м/с. Тан-

генциальная составляющая силы резания  $P_z = \sigma \cdot S_{мэн}$ , где  $S_{мэн} = \frac{B \cdot V_{дем} \cdot t}{V_{кр}}$  – мгновен-

ная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м<sup>2</sup>;  $B$  – ширина шлифования, м. Тогда

$$Q = \sigma \cdot B \cdot V_{дем} \cdot t \cdot \tau. \quad (14)$$

Время контакта шлифовального круга с фиксированной точкой, расположенной на обрабатываемой поверхности, равно  $\tau = l / V_{дем}$ , где  $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$  – длина контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом, м [5]. Площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью  $F = B \cdot l$ . После несложных преобразований зависимость (13) с учетом зависимостей (8) и (14) выразится

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{дем}}{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}}. \quad (15)$$

В итоге получена приближенная зависимость для определения температуры шлифования  $\theta$  с учетом того, что все тепло, образующееся при резании, уходит в обрабатываемую деталь. Для того, чтобы получить точную зависимость для определения температуры шлифования  $\theta$ , учитывающую баланс тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, необходимо в зависимости (7) количество тепла  $Q_1$  выразить зависимостью (11). Это эквивалентно умножению зависимости (15) на множитель

$$\frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot V_{рез}}{a}}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot V_{дем}}{a} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}}\right)}.$$

Тогда зависимость (15) выразится

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{дем}}{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot V_{дем}}{a} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}}\right)}. \quad (16)$$

Как показано выше, при шлифовании значения температуры  $\theta$ , рассчитанные по зависимости (15), будут незначительно отличаться от значений температуры  $\theta$ , рассчитанных по зависимости (16). Поэтому для приближенных расчетов температуры шлифования можно использовать зависимость (15), а для уточненных – зависимость (16).

Оценим отношение  $Q_1 / Q$  на основе зависимости (11) для процесса точения. Скорость  $V_{рез}$  в этом случае равна  $V_{рез} = V \cdot tg\beta$  [7], где  $V$  – скорость резания, м/с;  $\beta$  – угловой угол сдвига обрабатываемого материала. Вместо глубины шлифования  $t$  в зависимости (11) необходимо рассматривать толщину среза  $\Pi$ . Для исходных данных:  $\Pi = 0,2 \cdot 10^{-3}$  м;  $V = 20$  м/с;  $tg\beta = 0,3$ ;  $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (обрабатываемый материал – сталь ШХ15) получено  $Q_1 / Q = 0,059$ . Следовательно, в обрабатываемую деталь уходит всего 5,9 % тепла, а в образующуюся стружку – основная часть тепла, равная 94,1 %. Данные результаты противоположны результатам, полученным при шлифовании. Поэтому применение процесса точения взамен шлифования позволяет кардинальным путем решить проблему отвода тепла в образующуюся стружку, снижения температуры резания и повышения качества обработки за счет исключения образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Полученные результаты согласуются с известными практическими данными, что свидетельствует о достоверности полученных теоретиче-

ских решений. Расчет температуры резания при точении, в отличие от процесса шлифования, следует производить по зависимости (4), поскольку  $Q_1 \rightarrow 0$ , а  $Q_2 \approx Q$ .

## ВЫВОДЫ

1. Предложен общий теоретический подход к определению теплового баланса и температуры при механической обработке. Получены аналитические зависимости для определения количества тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и стружку при резании лезвийным инструментом (на примере процесса точения) и шлифовании. Расчетами установлено, что при шлифовании образующееся тепло фактически все уходит в обрабатываемую деталь, а при точении, наоборот, фактически все тепло уходит в стружку.

2. Теоретически установлено, что уменьшить температуру при шлифовании можно главным образом за счет уменьшения условного напряжения резания (энергоёмкости обработки) путем повышения режущей способности круга и уменьшения интенсивности трения в зоне шлифования. Основным условием уменьшения температуры при лезвийной обработке является уменьшение разности условного угла трения на передней поверхности инструмента и переднего угла инструмента.

### Перечень ссылок

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
4. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 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. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
6. 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.
7. Прогресивні технології механічної обробки: монографія / Новіков Ф.В., Крюк А.Г., Шкурупій В.Г. та ін.; за заг. ред. докт. техн. наук, професора Новікова Ф.В. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2012. – 372 с.
8. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: междуна. научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8-20.
9. Новиков Ф.В. Математическая модель определения температуры при глубинном шлифовании / Ф.В. Новиков, О.С. Кленов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. научн.-техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2009. – Вып. 76. – С. 133-141.

Рецензент: д.т.н., проф. Суглобов В. В.

Статья поступила 14.03.2013 г.