

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ ПРИ РЕЗАНИИ И ШЛИФОВАНИИ

В работе раскрыта физическая сущность закономерностей формирования температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при резании и шлифовании

Основным ограничивающим фактором повышения производительности и качества механической обработки является возникновение высоких температур резания, которые снижают стойкость режущего инструмента и приводят к различного рода температурным дефектам поверхностного слоя обрабатываемой детали, ухудшающим ее эксплуатационные свойства. Изучению температуры резания в научно-технической литературе уделено очень большое внимание, как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Однако, до сих пор отсутствуют простые инженерные, полученные аналитическим путем, формулы для расчета температуры резания. Имеющиеся решения, как правило, сводятся к расчету сложных температурных полей на основе уравнения Лапласа, что не позволяет просто и понятно проследить ход формирования температуры резания и оценить влияние на нее различных технологических факторов: режимов резания, характеристик инструмента и т.д. Этим можно объяснить различный, установленный экспериментально, характер изменения температуры резания в зависимости от условий обработки. В одних случаях температура резания непрерывно увеличивается с изменением параметров режима резания, а в других – первоначально увеличивается, затем, фактически стабилизируется. Такой характер изменения температуры резания наблюдается как при абразивной, так и при лезвийной обработке. Вместе с тем, отсутствует единый подход к анализу изменения температуры резания для различных видов механической обработки, который, по-видимому, должен базироваться на едином представлении механизма формирования температуры резания независимо от вида обработки и режущих инструментов. Такого рода решения чрезвычайно важны для оценки технологических возможностей (в плане снижения температуры резания) различных процессов обработки, особенно с целью обоснования условий повышения качества обработки.

Среди большого количества фундаментальных работ по теплофизике механической обработки следует особо выделить работы проф. Якимова А.В. [1, 2], которые в основном посвящены теплофизике процесса шлифования, но в которых также сформулированы общие подходы к расчету температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при механической обработке. В своих работах при исследовании тепловой напряженности процесса шлифования проф. Якимов А.В. удачно сочетает теоретические решения, полученные на основе расчета сложных температурных полей методами математической физики, и решения, полученные на основе упрощенных расчетных схем, например, рас-

смаатривая обрабатываемый материал в виде множества адиабатических прямолинейных стержней, на свободных торцах которых действует движущийся тепловой источник, моделирующий условия механического взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемым материалом. В более поздних работах проф. Якимов А.В. предложил рассматривать процесс перерезания стержней, т.е. процесс движения теплового источника вдоль стержня, что позволяет приблизить расчетную схему теплообразования при резании к реальной и проследить механизм формирования температуры в более сложных условиях.

На основе данного подхода получен ряд важных теоретических решений [3, 4], которые указывают на существование условия стабилизации температуры резания вследствие теплового насыщения поверхностного слоя обрабатываемой детали. Это свидетельствует о более сложной теплофизике процесса резания, что может стать основой для объяснения установленных экспериментально различных по характеру изменения зависимостей температуры от параметров режима резания для различных видов механической обработки.

Целью настоящей работы является теоретический анализ путей снижения температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при механической обработке и повышения производительности и качества обработки на основе нового подхода, учитывающего условия стабилизации температуры резания, т.е. по сути условия теплового насыщения поверхностного слоя обрабатываемой детали.

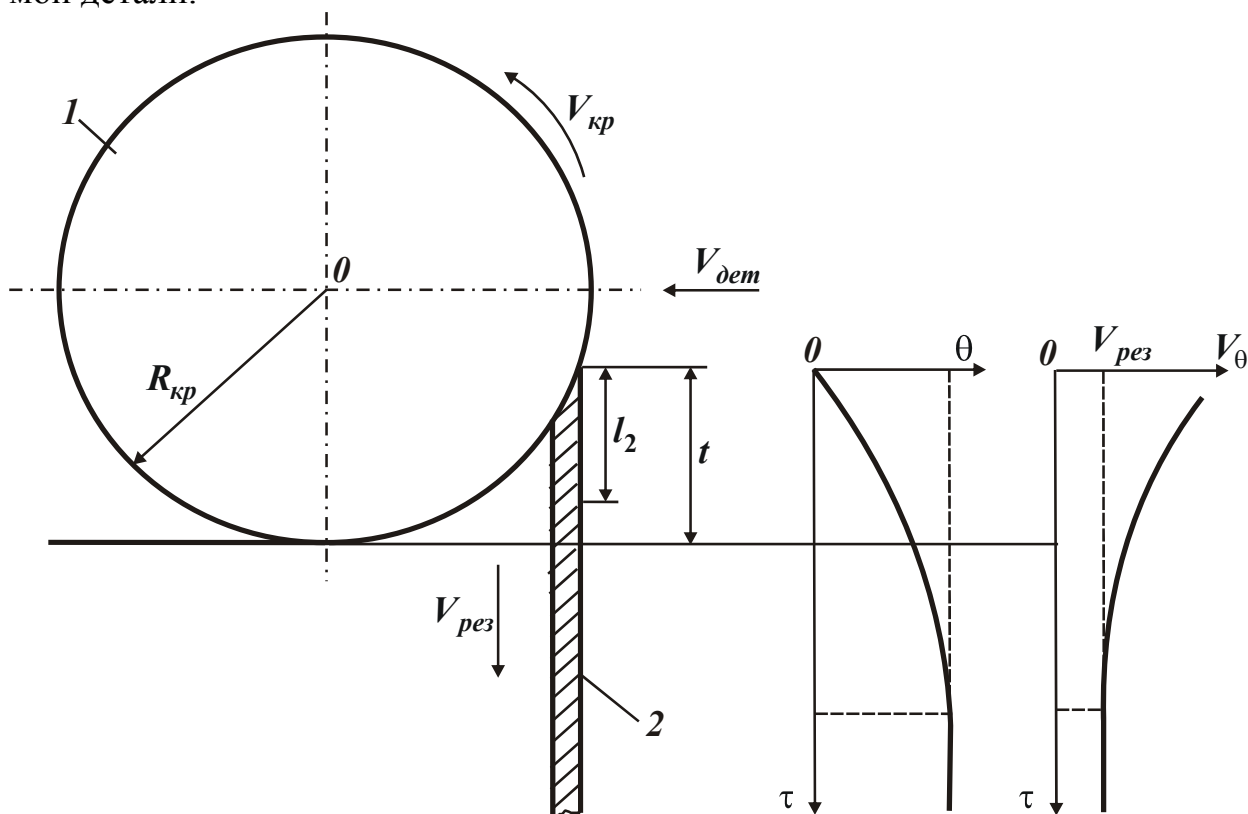


Рисунок 1 – Расчетная схема шлифования с учетом перерезания стержня: 1 – круг; 2 – стержень.

Рассмотрим основные положения данного подхода, исходя из расчетной схемы процесса шлифования, показанной на рис. 1 и учитывающей перерезание

адиабатических стержней, которыми условно представлен обрабатываемый материал [4]. Теоретически установлено, что по мере перемещения теплового источника вдоль рассматриваемого адиабатического стержня, возникающая в нем температура увеличивается до определенного предела, затем стабилизируется. Условием стабилизации температуры является равенство скорости перемещения теплового источника вдоль стержня $V_{рез}$ и мгновенной скорости распространения тепла вдоль стержня V_{θ} . Время стабилизации τ , длина пройденного при этом пути теплового источника l_2 и наибольшая температура θ в стержне (т.е. в момент ее стабилизации) определяются зависимостями:

$$\tau = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho_m \cdot V_{рез}^2}, \quad (1)$$

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot V_{рез}}, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ_m – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $V_{рез}$ – скорость перемещения теплового источника вдоль стержня, м/с.

Как видим, чем больше скорость перемещения теплового источника вдоль стержня $V_{рез}$ (с физической точки зрения определяющая скорость перерезания стержня), тем меньше параметры τ и l_2 , т.е. тем быстрее достигается стабилизация температуры θ . Как следует из зависимости (3), температура не зависит от скорости $V_{рез}$, а определяется лишь условным напряжением резания σ , характеризующим в первую очередь режущую способность круга и интенсивность трения шлифовального круга с обрабатываемым материалом. Меньшему значению σ соответствует меньшее значение температуры θ .

В общем случае условное напряжение резания σ может изменяться в широких пределах. При лезвийной обработке оно значительно меньше, чем при абразивной обработке (шлифовании материалов). Поэтому при лезвийной обработке следует ожидать меньших значений температуры резания θ . Так, исходя из аналитической зависимости [3], учитывающей лишь энергию “чистого резания” при обработке (без учета трения, например, связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом), условное напряжение резания σ описывается зависимостью

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м²; $K_{рез}$ – коэффициент резания, равный отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания.

Как известно, при шлифовании коэффициент резания $K_{рез}$ принимает небольшие значения $0,1 \dots 1,0$, а при лезвийной обработке – большие значения – $1 \dots 10$. Следовательно, условное напряжение резания σ при лезвийной обработке может быть в $10 \dots 100$ раз меньше, чем при шлифовании. Поэтому стабилизация температуры θ при лезвийной обработке будет наступать при ее меньших значениях.

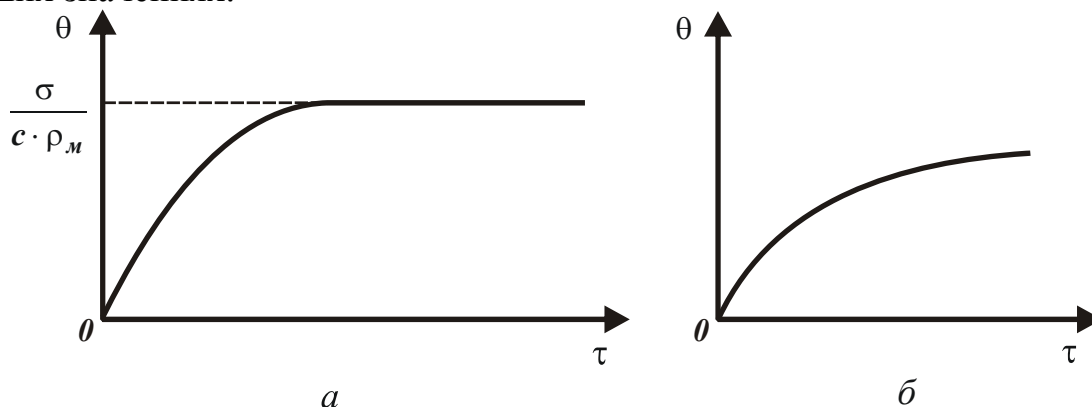


Рисунок 2 – Примерные зависимости изменения температуры θ от времени τ .

Таким образом, при лезвийной обработке более типичным будет график изменения температуры θ от времени перемещения теплового источника вдоль перерезаемого адиабатического стержня τ , показанный на рис. 2,а, а при шлифовании – график, показанный на рис. 2,б. Это связано с тем, что во втором случае стабилизация температуры будет происходить при ее относительно больших значениях вследствие увеличенных значений условного напряжения резания σ , обусловленных как процессом “чистого резания”, так и весьма интенсивным процессом трения круга с обрабатываемым материалом (в результате его затупления и засаливания).

Проведем анализ параметра l_2 . Очевидно, при $l_2 < t$ или $l_2 < a$ (где t – глубина шлифования, м; a – толщина среза при точении, м) будет справедлива зависимость, показанная на рис. 2,а. При $l_2 > t$ или $l_2 > a$ – наоборот, будет справедлива зависимость, показанная на рис. 2,б.

Определим условия обработки, при которых $l_2 < t$ (или $l_2 < a$). Как показано в работе [4], при шлифовании скорость перерезания стержня $V_{рез}$ определяется по зависимости

$$V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot \rho}{2}}, \quad (5)$$

где $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$; $R_{кр}, R_{дет}$ – соответственно радиусы круга и детали, м.

При точении скорость перерезания стержня $V_{рез}$ определяется по зависимости

$$V_{рез} = V \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (6)$$

где V – скорость резания, м/с; β – условный угол сдвига материала при резании.

Из условия $l_2 < t$, с учетом зависимости (2), имеем

$$V_{\text{дет}} > \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{2}{t \cdot \rho}} \quad (7)$$

Как видим, чем больше глубина шлифования t , тем меньше скорость детали $V_{\text{дет}}$, табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные значения $V_{\text{дет}}$ для плоского шлифования твердого сплава ВК8 ($\lambda=50$ Вт/(м·К); $c=175,9$ Дж/(кг·К); $\rho_m=15 \cdot 10^3$ кг/м³; $R_{\text{кр}}=0,15$ м; $R_{\text{дет}}=0$)

| | | | | | | |
|--------------------------|-------|------|------|-----|-----|------|
| $t \cdot 10^{-3}$, м | 0,01 | 0,05 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 10,0 |
| $V_{\text{дет}}$, м/с | 327,8 | 29,2 | 10,8 | 0,9 | 0,3 | 0,01 |
| $V_{\text{дет}}$, м/мин | 19668 | 1752 | 648 | 54 | 18 | 0,6 |

Однако, значения, которые принимает скорость детали $V_{\text{дет}}$, практически не реализуются при шлифовании. Исключением может быть лишь скорость детали $V_{\text{дет}}=0,6$ м/мин при глубине шлифования $t=10$ мм, т.е. при глубинном шлифовании. Из этого можно сделать вывод, что при шлифовании справедлива зависимость изменения температуры резания, показанная на рис. 2,б, и лишь при глубинном шлифовании возможна зависимость, показанная на рис. 2,а.

Определим предельные значения скорости резания V при точении. Из условия $l_2 < a$, с учетом зависимостей (2) и (6), имеем:

$$V > \frac{\lambda}{c \cdot \rho_m \cdot a \cdot \text{tg}\beta} \quad (8)$$

Условный угол сдвига β при оценочных расчетах (в первом приближении) примем равным 20° ($\text{tg } 20^\circ=0,364$).

Таблица 2 – Расчетные значения $V_{\text{дет}}$ для плоского шлифования твердого сплава ВК8 ($\lambda=50$ Вт/(м·К); $c=175,9$ Дж/(кг·К); $\rho_m=15 \cdot 10^3$ кг/м³)

| | | | | | | |
|-----------------------|------|------|-----|-----|-----|------|
| $a \cdot 10^{-3}$, м | 0,01 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 |
| V , м/с | 5,2 | 1,0 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0,05 |
| V , м/мин | 312 | 60 | 30 | 12 | 6 | 3 |

Как следует из табл. 2, во всем рассматриваемом диапазоне изменения толщины среза a скорость резания V принимает значения, которые могут быть реализованы в процессе точения. Следовательно, при точении типичной зависимостью, определяющей характер изменения температуры резания будет зависимость, показанная на рис. 2,а.

Полученные результаты хорошо согласуются с практическими данными. Так, в научно-технической литературе приведенные экспериментальные графиче-

ки изменения температуры резания при шлифовании подчиняются зависимости, показанной на рис. 2,б. Исключением являются приведенные в работе [5] графики, полученные при глубинном шлифовании, в которых температура резания изменяется по зависимости, близкой к зависимости, показанной на рис. 2,а.

Если же проанализировать работы, посвященные экспериментальному исследованию температуры резания при точении, то практически во всех случаях обработки изменение температуры резания от параметров режимов резания подчиняется зависимости, показанной на рис. 2,а. К сожалению, в научно-технической литературе не обоснованы физические причины такого характера изменения температуры резания и отсутствуют аналитические зависимости, по которым можно рассчитать условия формирования температуры резания в зависимости от вида механической обработки. Поэтому изучение теплофизики резания на основе предложенного в работе подхода, позволяющего (за счет учета перерезания адиабатических стержней, которыми условно представлен обрабатываемый материал заготовки) раскрыть физическую сущность формирования температуры резания при абразивной и лезвийной обработке, представляет определенный интерес и требует проведения дальнейших исследований.

Представляет также теоретический и практический интерес вопрос о распределении количества тепла, которое уходит на нагревание образующихся стружек и поверхностного слоя обрабатываемого материала заготовки. Для этого составим уравнение теплового баланса при механической обработке. В случае $l_2 > a$ при точении (или $l_2 > t$ при шлифовании), исходя из приведенных в работе решений, уравнение теплового баланса для процесса точения примет вид:

$$a + (l_2 - a) = l_2 \quad (9)$$

или в относительных величинах

$$\frac{a}{l_2} + \frac{(l_2 - a)}{l_2} = 1. \quad (10)$$

Первое слагаемое в уравнении (10) определяет количество тепла, которое уходит на нагревание образующихся стружек. Второе слагаемое определяет количество тепла, которое уходит на нагревание поверхностного слоя обрабатываемого материала. К такому же уравнению приходим и при шлифовании:

$$\frac{t}{l_2} + \frac{(l_2 - t)}{l_2} = 1. \quad (11)$$

В случае $l_2 < a$ уравнение теплового баланса для процесса точения видоизменится:

$$\frac{a}{(l_2 + a)} + \frac{l_2}{(l_2 + a)} = 1. \quad (12)$$

В приведенных уравнениях правая часть определяет общее количество тепла, образующееся при обработке. Как показано выше, при точении выполняется условие $l_2 < a$, поэтому основная часть тепла будет уходить на нагрев об-

разующейся стружки, в деталь будет уходить значительно меньшее количество тепла. При шлифовании, наоборот, в деталь может уходить больше тепла, чем в стружку. Этим объясняются многочисленные проблемы, возникающие в связи с образованием прижогов на обработанной поверхности и других температурных дефектов обработки, и необходимостью их устранения за счет применения различных эффективных технологических методов (например, за счет применения прерывистого шлифования, СОЖ и т.д.).

Таким образом, в работе на основе предложенного подхода раскрыта физическая сущность формирования температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при резании и шлифовании, приведены аналитические зависимости для расчета температуры.

Список литературы: **1.** Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. **2.** Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с. **3.** Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов Б.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. **4.** Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке // Физические и компьютерные технологии. Труды 11-й Межд. Научн.-техн. конф., 2-3 июня 2005 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2005. – С.137-146 **5.** Силин С.С., Хрульков В.А., Ласанов А.В., Рыкунов Н.С. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.