

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НА ОСНОВЕ УЧЕТА БАЛАНСА ТЕПЛА, УХОДЯЩЕГО В ОБРАЗУЮЩИЕСЯ СТРУЖКИ И ОБРАБАТЫВАЕМУЮ ДЕТАЛЬ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет)

Введение. Изучение вопросов теплофизики шлифования имеет большое теоретическое и практическое значение с точки зрения обеспечения качества, производительности и экономичности обработки. В известных работах [1, 2, 3] получены важные аналитические решения по определению температуры при шлифовании и эффективных путей ее снижения. Вместе с тем, проблема снижения тепловой напряженности процесса шлифования в полной мере не решена, что требует проведения дальнейших исследований.

Цель работы. Целью данной работы является разработка математической модели определения температуры при шлифовании на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь.

Материалы и результаты исследований. Основываясь на известных подходах к расчету температуры при шлифовании, предложенных проф. Якимовым А.В., получим новое решение задачи определения температуры при шлифовании с учетом движения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали [4]. Иными словами, получим решение с учетом перерезания адиабатических стержней, которыми условно представлен обрабатываемый материал, рис. 1. Будем считать, что в процессе шлифования часть стержня, равная величине снимаемого припуска (или в первом приближении – равная глубине шлифования t) перерезается шлифовальным кругом, рис. 1.

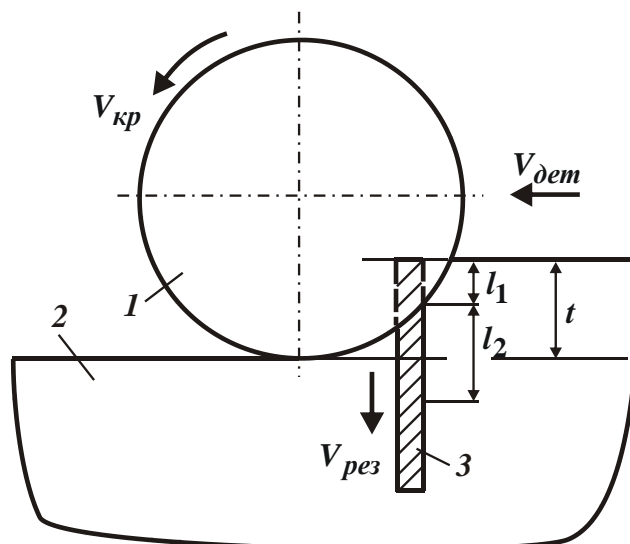


Рис. 1. Расчетная схема процесса шлифования: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – адиабатический стержень.

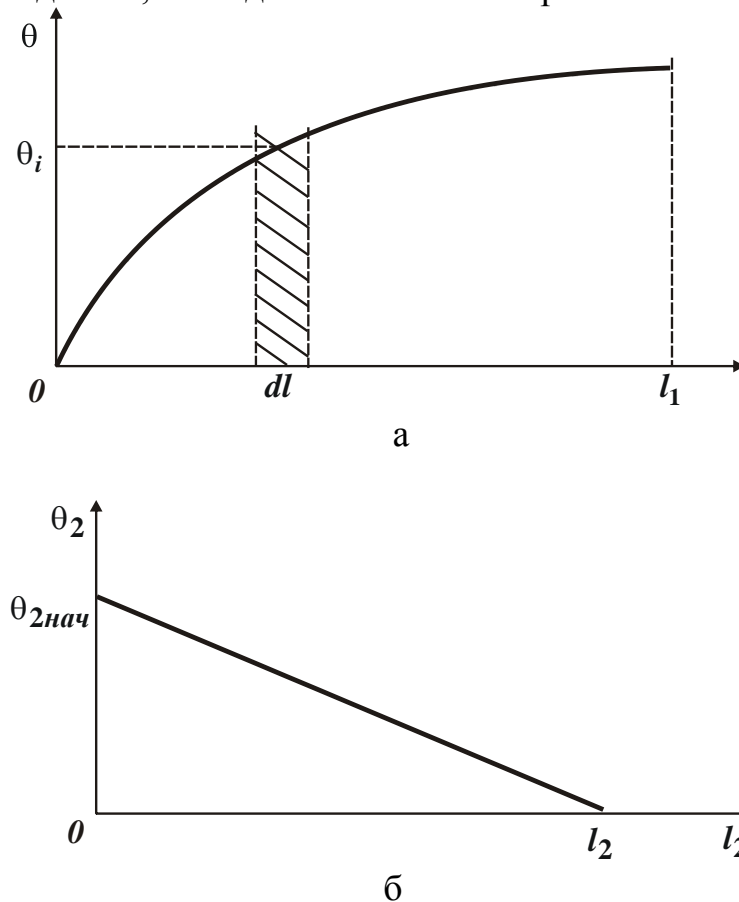


Рис. 2. Характер изменения температуры по длине первого l_1 (а) и второго l_2 (б) участков стержня.

Предположим, что за время действия теплового источника τ произошло перерезание стержня длиной l_1 , т.е. тепловой источник переместился вдоль стержня на величину $l_1 = V_{рез} \cdot \tau$, и за это время в результате резания выделено количество тепла Q (где $V_{рез}$ – скорость перерезания стержня, м/с). Это тепло, во-первых, ушло на нагревание стержня длиной l_1 (затрачено количество тепла Q_1), во-вторых, на нагревание стержня длиной l_2 за счет теплопроводности обрабатываемого материала (затрачено количество тепла Q_2), рис. 1: $Q = Q_1 + Q_2$. Количество тепла Q_1 можно математически выразить следующим образом. Разобьем стержень длиной l_1 на бесконечное множество элементарных участков длиной Δl (рис. 2,а). Предположим, что каждый из них нагрелся до разной температуры: первый – до температуры θ_1 , второй – до температуры θ_2 и т.д. Тогда количество тепла, затраченное на нагрев первого участка стержня длиной l_1 , будет равно $Q_{11} = c \cdot m_1 \cdot \theta_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_1$, где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); $m_1 = \rho \cdot V_1 = \rho \cdot S \cdot \Delta l$ – масса первого участка стержня длиной Δl , кг; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; V_1 – объем первого участка

стержня длиной Δl , м³; S – площадь поперечного сечения стержня, м². Аналогичным образом определяются значения количества тепла Q_{12} и Q_{1n} , затрачиваемые на нагрев второго и n -ного участков стержня: $Q_{12} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_2$; $Q_{1n} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_n$. Суммарное количество тепла, затрачиваемое на нагрев всего стержня длиной l_1 , определится:

$$Q_1 = Q_{11} + Q_{12} + \dots + Q_{1n} = \sum_i^n Q_{1i} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \sum_i^n \theta_i \cdot \Delta l = c \cdot \rho \cdot S \cdot \int_0^{l_1} \theta \cdot dl = \\ = c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau,$$

где θ_i – температура нагрева i -того (текущего) участка стержня длиной l_1 ; θ – функция температуры нагрева стержня длиной l_1 от времени; $dl = \Delta l = V_{рез} \cdot d\tau$; $V_{рез}$ – скорость перерезания стержня, м/с; $d\tau$ – время, за которое происходит перерезание стержня длиной dl .

Определим количество тепла Q_2 , затрачиваемое на нагрев стержня длиной l_2 (рис. 2,б). Для этого воспользуемся известной из курса физики зависимостью для определения количества тепла, протекшего через стержень длиной l_2 в результате его теплопроводности:

$$Q_2 = \lambda \cdot S \cdot \frac{\theta_{2нач} - \theta_{2кон}}{l_2} \cdot \tau_2, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; $\theta_{2нач}$ – температура на торце оставшейся после перерезания части стержня длиной l_2 ; $\theta_{2кон} = 0$ – температура на конце стержня длиной l_2 (условно равна нулю); τ_2 – время нагрева стержня длиной l_2 .

Характер изменения температуры по длине стержня l_2 в результате его теплопроводности показан на рис. 2,б. Будем считать, что количество тепла $Q_2 = c \cdot m \cdot \theta_2 \cdot 0,5$, затрачиваемое на нагрев стержня длиной l_2 равно количеству тепла, определяемому зависимостью (1), протекшего через стержень длиной l_2 в результате его теплопроводности.

В зависимости для определения Q_2 приняты следующие обозначения: m – масса стержня длиной l_2 , кг; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; V_2 – объем стержня длиной l_2 , м³; S – площадь поперечного сечения стержня, м²; $\theta_2 = \theta_{2нач}$ – температура на торце оставшейся после перерезания части стержня длиной l_2 . Введенный в зависимость коэффициент 0,5 определяет среднюю температуру нагрева стержня длиной l_2 . После преобразований: $Q_2 = 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot l_2 \cdot \theta_2$. Выразим длину стержня l_2 с помощью зависимости (1). Для этого примем в зависимости (1): $Q_2 = N \cdot \tau_2$; $\theta_{2нач} - \theta_{2кон} = \theta_2$, где N – мощность теплового источника, Вт. Тогда

$$Q_2 = 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2^2}{N}. \quad (2)$$

Количество тепла $Q = Q_1 + Q_2$, которое ушло на нагревание двух частей стержня длиной $(l_1 + l_2)$, с учетом зависимости $Q = N \cdot \tau$ (где N – мощность теплового источника; τ – время перерезания стержня длиной l_1 , равное времени действия теплового источника), равно

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau + 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2^2}{N} = N \cdot \tau. \quad (3)$$

В результате пришли к интегральному уравнению, в котором неизвестны величины θ и θ_2 , зависящие от времени τ . Для упрощения решения уравнения (3) продифференцируем его правую и левую части по времени τ , т.е. продифференцируем все слагаемые уравнения (3) с учетом условия $\theta(\tau) = \theta_2$:

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \theta_2 + c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2 \cdot \theta_2'}{N} = N \text{ или } \theta' \cdot \theta + A \cdot \theta = B, \quad (4)$$

где θ_2' – первая производная функции $\theta_2 = \theta$ по времени τ ; $\theta(\tau)$ – температура на последнем элементарном участке стержня длиной l_1 , т.е. на длине стержня l_1

$$; A = \frac{V_{рез} \cdot N}{\lambda \cdot S}; \quad B = \frac{N^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2}.$$

В результате пришли к дифференциальному уравнению первого порядка. Его решение с учетом соотношения $q = N/S = \sigma \cdot V_{рез}$ (где q – плотность теплового потока, Вт/м²; σ – условное напряжение резания, Н/м²):

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta} \right]. \quad (5)$$

Очевидно, температура θ с увеличением времени τ увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $\sigma/c \cdot \rho$, рис. 3. Учитывая сложный характер взаимосвязи температуры θ с временем действия теплового источника τ , введем новый параметр – относительную величину температуры

$z = \theta / \left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho} \right)$ и проведем анализ его изменения. Для этого выразим в

зависимости (5) температуру θ через безразмерную величину z :

$$l_1 = -\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} \cdot [\ln(1-z) + z] = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} \cdot \bar{l}_1, \quad (6)$$

где $\bar{l}_1 = -\ln(1-z) - z$.

В итоге получена довольно простая зависимость для определения длины части стержня l_1 , табл. 1. Как видно, чем больше безразмерная величина \bar{l}_1 , тем больше относительная величина температуры z , которая асимптотически

приближается к единице. По такому же закону будет изменяться относительная величина z в зависимости от времени действия теплового источника τ :

$$\tau = \frac{l_1}{V_{рез}} = -\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2} \cdot [\ln(1-z) + z] = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2} \cdot \bar{l}_1. \quad (7)$$

Таблица 1

Расчетные значения \bar{l}_1

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|--------|
| z | 0,091 | 0,167 | 0,333 | 0,5 | 0,632 | 0,85 | 0,9 | 0,99 | 0,999 | 0,9999 |
| \bar{l}_1 | 0,004 | 0,015 | 0,072 | 0,193 | 0,368 | 1,047 | 1,4 | 2,005 | 3,6 | 6,0 |

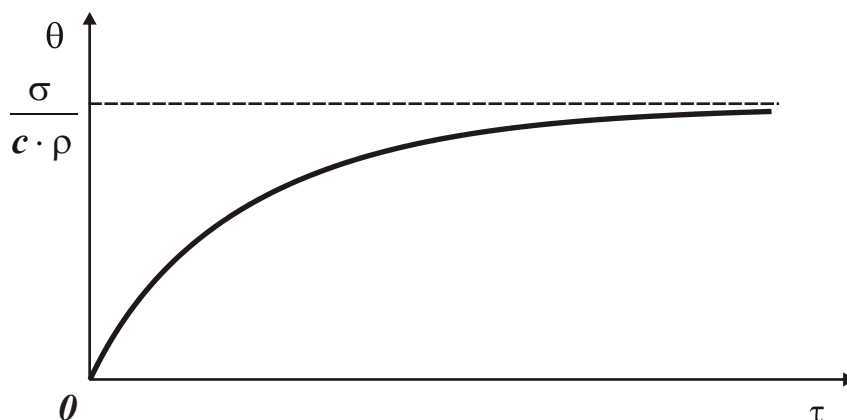


Рис. 3. Зависимость температуры θ от времени τ .

Задавая значения $\lambda, c, \rho, V_{рез}$ и z , определяя из табл. 1 значения \bar{l}_1 , по зависимости (7) можно рассчитать время τ . Таким образом, предложена методика расчета температуры при шлифовании θ по известной величине z . Ее суть состоит в том, что первоначально для заданных значений τ и l_1 определяются безразмерные параметры \bar{l}_1 и z . Затем по зависимости $\theta = \left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho} \right) \cdot z$ определяется температура при шлифовании θ .

Установим характер изменения толщины поверхностного слоя обрабатываемой детали, в котором концентрируется тепло, равной длине стержня l_2 :

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot S \cdot \theta}{N} = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}} \cdot \bar{l}_2, \quad (8)$$

где $\bar{l}_2 = z$.

Сравнивая зависимости (7) и (8), видим, что они отличаются лишь вторым безразмерным множителем. На рис. 4,а представлен график относительной величины температуры z от безразмерной величины \bar{l}_1 . Как видно, с увеличением \bar{l}_1 относительная величина температуры z непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. На рис. 4,а показан характер изменения относительной величины температуры z на двух участках

рассматриваемого адиабатического стержня с длинами l_1 и l_2 . На участке стержня длиной l_1 , соответствующей безразмерной величине \bar{l}_1 , относительная величина температуры z изменяется нелинейно (по экспоненциальному закону), а на участке длиной l_2 , соответствующей безразмерной величине \bar{l}_2 , — линейно. При этом безразмерная величина \bar{l}_2 равна ординате графика z , т.е. показанный на рис. 4,а угол α равен 45° .

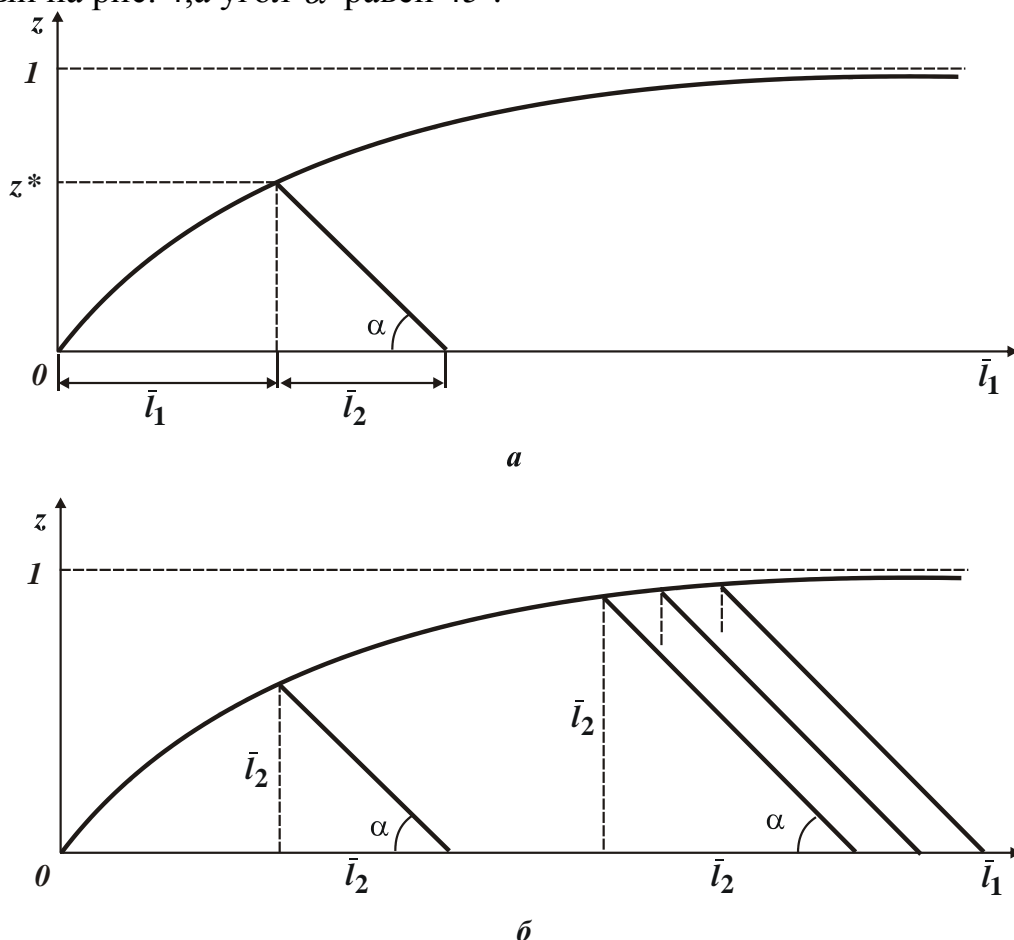


Рис. 4. Зависимость относительная величина температуры z от \bar{l}_1 .

На рис. 4,б показан характер изменения относительной величины температуры z на двух участках рассматриваемого стержня для различных значений \bar{l}_1 (различных значений длительности действия теплового источника τ). Как видно, с увеличением \bar{l}_1 увеличивается пропорционально безразмерная величина \bar{l}_2 и относительная величина температуры z . Угол α , показанный на рис. 4,б, всегда остается постоянным, равным 45° . При $z \rightarrow 1$ безразмерная величина \bar{l}_2 практически стабилизируется и не зависит от длины перемещения теплового источника \bar{l}_1 , т.е. от длительности действия теплового источника τ . Для наглядности в табл. 2 приведены расчетные значения безразмерных величин \bar{l}_1 , \bar{l}_2 и отношения \bar{l}_2/\bar{l}_1 в зависимости от величины z .

Таблица 2

Расчетные значения безразмерных величин \bar{l}_1 , \bar{l}_2 и \bar{l}_2/\bar{l}_1

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| z | 0,091 | 0,167 | 0,333 | 0,5 | 0,632 | 0,85 | 0,9 | 0,99 | 0,999 | 0,9999 |
| \bar{l}_1 | 0,004 | 0,015 | 0,072 | 0,193 | 0,368 | 1,047 | 1,4 | 2,005 | 3,6 | 6,0 |
| \bar{l}_2 | 0,091 | 0,167 | 0,333 | 0,5 | 0,632 | 0,85 | 0,9 | 0,99 | 0,999 | 0,9999 |
| \bar{l}_2/\bar{l}_1 | 22,75 | 11,13 | 4,625 | 2,59 | 1,717 | 0,818 | 0,643 | 0,495 | 0,278 | 0,167 |

Из табл. 2 следует, что при $z < 0,8$ справедливо неравенство $\bar{l}_2 > \bar{l}_1$, а при $z > 0,8$ – наоборот, $\bar{l}_2 < \bar{l}_1$. Причем, начиная с $z = 0,8$ безразмерная величина \bar{l}_2 остается практически постоянной с изменением z , а безразмерная величина \bar{l}_1 – непрерывно увеличивается. Из этого следует, что при $z \rightarrow 1$ происходит стабилизация во времени безразмерной величины \bar{l}_2 и соответственно температуры θ . С учетом сказанного параметр l_2 и время τ для установившегося теплового процесса определяются:

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}}; \quad \tau = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2} \quad (9)$$

В общем случае (для неустановившегося теплового процесса) расчет текущей температуры шлифования θ можно производить по зависимости:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z, \quad (10)$$

используя расчетные значения z , приведенные в табл. 2, с учетом значений $l_1 = V_{рез} \cdot \tau$, т.е. в зависимости от длины l_1 или времени τ . Для установившегося теплового процесса в зависимости (10) значение z следует принять равным единице.

Используя полученное решение, произведем оценку баланса тепла, образующегося при обработке, на основе уравнения: $\frac{Q_1}{Q} + \frac{Q_2}{Q} = 1$. После преобразований установлено:

$$\frac{Q_1}{Q} = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}; \quad \frac{Q_2}{Q} = \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}. \quad (11)$$

Как видно, относительные величины Q_1/Q и Q_2/Q являются противоположными и вполне однозначно определяются относительной величиной температуры z , табл. 3. Чем больше величина z , тем больше Q_1/Q и меньше Q_2/Q . Следовательно, с увеличением z доля тепла Q_1/Q , уходящего в образующиеся стружки, увеличивается, а доля тепла Q_2/Q , уходящего в обрабатываемую деталь, уменьшается. Из этого вытекает, что при высокопроизводительной обработке, характеризующейся относительно большими температурами резания, доля тепла, уходящего в стружки, будет больше доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь.

Таблица 3

Расчетные значения Q_1/Q , Q_2/Q и Q_1/Q_2

| | | | | | | | | | |
|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| z | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 0,99 |
|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|

| | | | | | | | | | |
|-----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Q_1/Q | 0 | 0,07 | 0,14 | 0,21 | 0,38 | 0,44 | 0,53 | 0,72 | 0,79 |
| Q_2/Q | 1 | 0,93 | 0,86 | 0,79 | 0,62 | 0,56 | 0,47 | 0,28 | 0,21 |
| Q_1/Q_2 | 0 | 0,075 | 0,163 | 0,266 | 0,613 | 0,786 | 1,128 | 2,571 | 3,762 |

Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. Еще в 1915 году проф. Усачев Я.Г. установил, что наибольшее количество тепла переходит в стружку, составляя при резании стали от 60 до 80% от общего количества тепла. С увеличением скорости резания доля тепла, уходящего в стружку, увеличивается, а ее средняя температура растет. На рис. 5 [5] показано влияние скорости резания на распределение тепла между стружкой, деталью и инструментом. Как видно, распределение тепла между стружкой, деталью и инструментом существенно зависит от скорости резания. Так, количество тепла, уходящего в стружку, возрастает, а в деталь и инструмент – уменьшается. Такой характер распределения тепла обусловлен увеличением температуры резания с увеличением скорости резания, рис. 6 [5].

Из рис. 5 вытекает, что доля тепла, уходящего в стружку, с увеличением скорости резания от 0 до $V=300$ м/мин увеличивается, асимптотически приближаясь к 80%, а доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, наоборот, уменьшается, асимптотически приближаясь к 20%. Точно такой же результат получен теоретически, табл. 3. Следовательно, для данных условий обработки величина z приближается к предельному значению $z \rightarrow 1$, при котором тепловой процесс при резании стабилизируется. Этим доказана возможность реализации на практике значений z , близких к предельному: $z \rightarrow 1$. Показано, что по экспериментально установленному количеству тепла, уходящему в стружку или обрабатываемую деталь, можно приблизительно оценить относительную величину температуры z , а по ней – абсолютную температуру резания. Такой подход к определению температуры резания является новым.

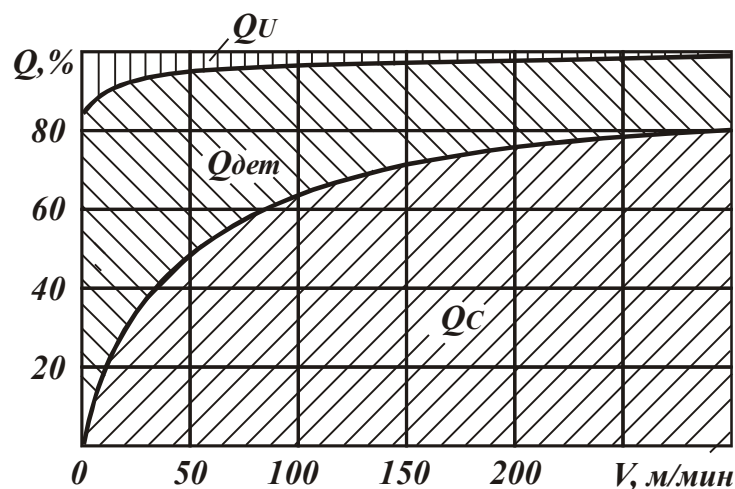


Рис. 5. Распределение тепла Q между стружкой, инструментом и деталью при точении стали 40Х резцом из твердого сплава Т10К6 ($t=1,5$ мм; $S=0,12$ мм/об).

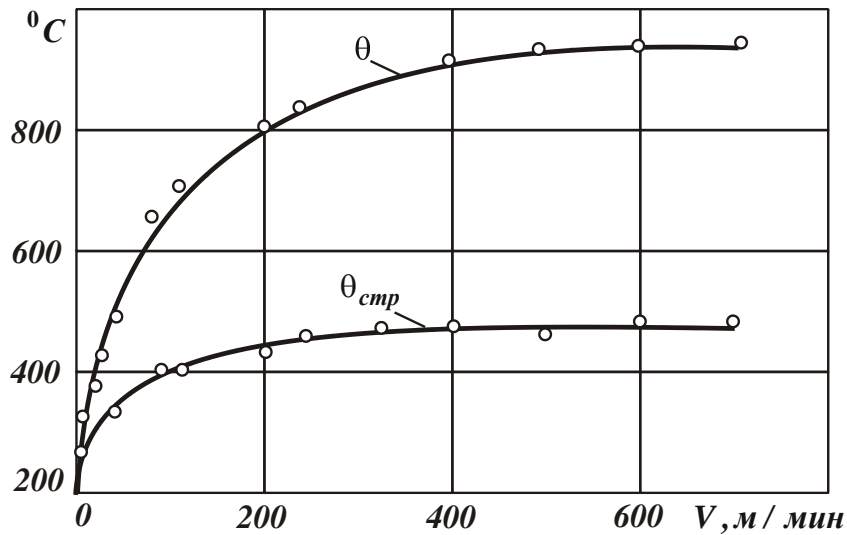


Рис. 6. Влияние скорости резания V на температуру резания θ и среднюю температуру стружки $\theta_{\text{сmp}}$ при точении стали 40Х резцом из твердого сплава Т10К6 ($t=1,5$ мм; $S=0,12$ мм/об).

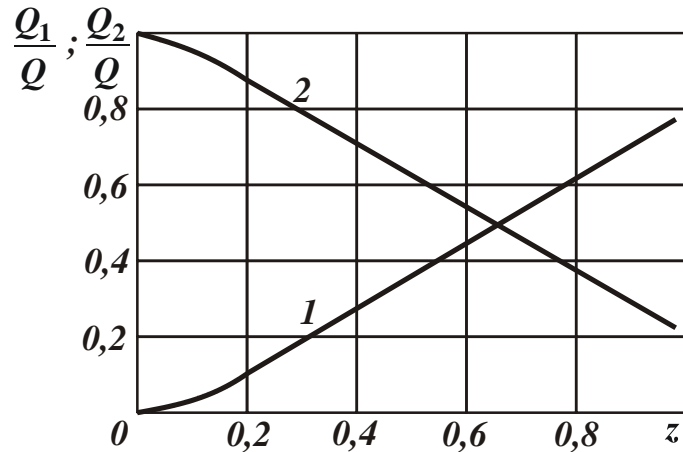


Рис. 7. Зависимости параметров Q_1/Q (1) и Q_2/Q (2) от z .

Из зависимостей (11) следует, что для уменьшения z необходимо уменьшить долю тепла Q_1/Q , уходящего в образующиеся стружки, и, наоборот, увеличить долю тепла Q_2/Q , уходящего в обрабатываемую деталь, рис. 7. Возникает вопрос, каким образом можно уменьшить Q_1/Q и увеличить Q_2/Q . Для этого обратимся к зависимости (6), представляя ее в виде:

$$[\ln(1-z) + z] = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot l_1 \cdot V_{\text{рез}} \cdot \quad (12)$$

Из зависимости (12) следует, что добиться уменьшения относительной величины температуры z и соответственно слагаемого уравнения теплового баланса Q_1/Q можно за счет уменьшения произведения $l_1 \cdot V_{\text{рез}}$, т.е. уменьшения, по сути, толщины срезаемого слоя l_1 и скорости перерезания адиабатического стержня $V_{\text{рез}}$ (скорости перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали). Необходимо отметить, что при плоском шлифовании величина l_1 равна глубине шлифования t .

Поэтому уменьшение величины l_1 предполагает уменьшение глубины шлифования t . Параметр $V_{рез}$ по физической сути определяет производительность обработки. Чем больше $V_{рез}$, тем больше производительность обработки. Таким образом установлено, что добиться уменьшения доли тепла Q_1/Q , уходящего в образующиеся стружки, можно за счет уменьшения производительности обработки. Это автоматически ведет к уменьшению относительной величины температуры z и к увеличению доли тепла Q_2/Q , уходящего в обрабатываемую деталь за счет ее теплопроводности. На рис. 8 показан характер изменения параметров Q_1/Q и Q_2/Q в зависимости от произведения $l_1 \cdot V_{рез}$ с учетом того, что связь между параметрами Q_1/Q , Q_2/Q и $l_1 \cdot V_{рез}$ осуществляется посредством относительной величины температуры z . Как следует из рис. 8, чем больше произведение $l_1 \cdot V_{рез}$, т.е. чем больше производительность обработки, тем больше Q_1/Q и меньше Q_2/Q . Из этого вытекает, например, что при глубинном шлифовании, характеризующимся относительно большой производительностью обработки, практически все выделяющееся тепло уходит в стружки. Однако и относительная величина температуры z и соответственно температура при шлифовании θ при этом будут наибольшими.

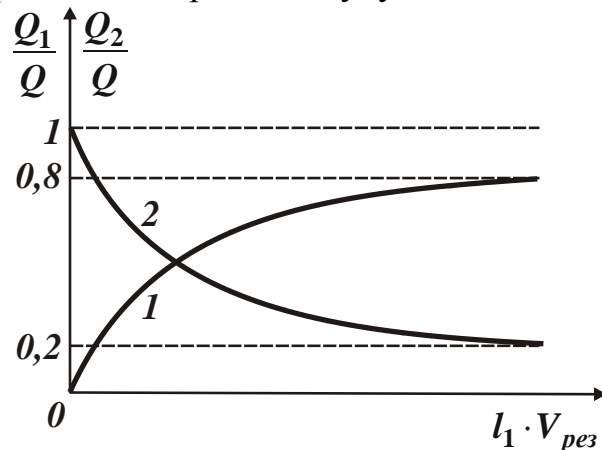


Рис. 8. Примерные зависимости параметров Q_1/Q (1) и Q_2/Q (2) от произведения $l_1 \cdot V_{рез}$.

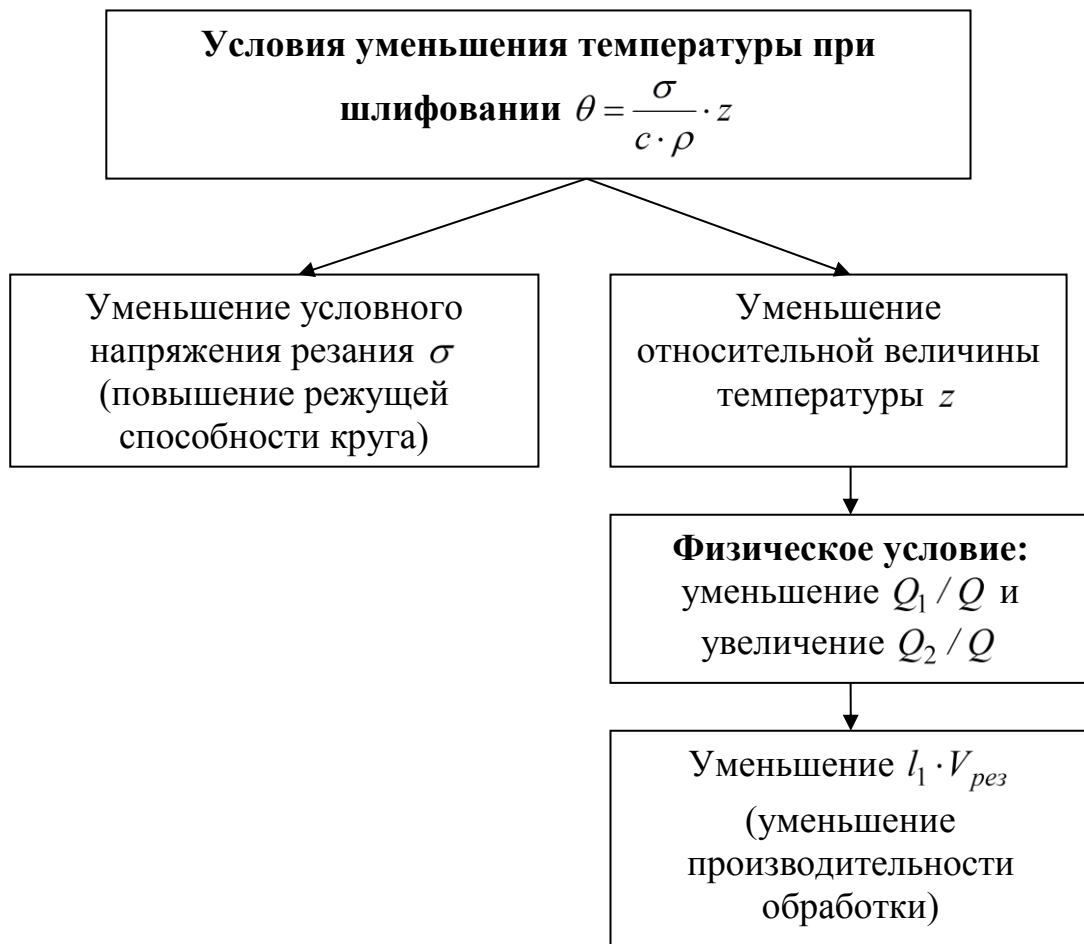


Рис. 9. Структурная схема условий уменьшения температуры при шлифовании θ .

На основе проведенного анализа можно сформулировать условия уменьшения температуры при шлифовании (или температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали). Согласно зависимости (10), температура при шлифовании θ определяется двумя величинами: σ и z . Чем они меньше, тем меньше θ . Поэтому уменьшение θ предполагает, во-первых, повышение режущей способности шлифовального круга и уменьшение условного напряжения резания σ . Во-вторых, – уменьшение относительной величины температуры z и, как показано выше, уменьшение доли тепла Q_1 / Q , уходящего в образующиеся стружки, и соответственно увеличение доли тепла Q_2 / Q , уходящего в обрабатываемую деталь, за счет ее теплопроводности. В свою очередь, уменьшение Q_1 / Q и увеличение Q_2 / Q возможно за счет уменьшения произведения $l_1 \cdot V_{рез}$, т.е. уменьшения главным образом производительности обработки. В теории шлифования принято считать, что производительность обработки непосредственно влияет на температуру при шлифовании. В действительности, как показано выше, влияние производительности обработки на температуру при шлифовании θ происходит не непосредственно, а через изменение доли тепла, уходящего в образующиеся

стружки и обрабатываемую деталь. На рис. 9 приведена структурная схема условий уменьшения температуры при шлифовании θ .

Выводы. Разработана новая математическая модель формирования температуры при шлифовании, основанная на учете баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь. Она позволила аналитически определить доли тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь, и установить их связь с температурой при шлифовании и толщиной поверхностного слоя обработанной детали, в котором концентрируется образующееся при шлифовании тепло. На основе разработанной математической модели получено принципиально новое теоретическое решение о характере изменения температуры при шлифовании, выражающееся в том, что с увеличением времени контакта шлифовального круга с фиксированным сечением обрабатываемой детали, в отличие от известного решения, температура увеличивается не бесконечно, а примерно по экспоненциальному закону, асимптотически приближаясь к значению, равному отношению условного напряжения резания к удельной теплоемкости и плотности обрабатываемого материала, и с физической точки зрения определяющему установившийся тепловой процесс.

Определены основные условия уменьшения температуры и повышения качества обработки, состоящие в уменьшении доли тепла, уходящего в образующиеся стружки, и увеличении доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, за счет уменьшения произведения глубины шлифования и скорости перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Список литературы

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Якимов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навч. посіб. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.
3. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 62 с.
4. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов // Труды 13-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.
5. Даниелян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. – М.: Машгиз, 1954. – 275 с.