

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Постановка проблемы.** Практикой установлено, что процесс шлифования обеспечивает высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, однако характеризуется высокой теплонапряженностью, а это приводит к значительным температурам шлифования и появлению на обрабатываемых поверхностях различного рода температурных дефектов (прижогов, микротрещин, сколов и т. д.), снижению твердости поверхностного слоя термообработанных деталей. При работе в условиях трения такие детали быстро изнашиваются и теряют свои эксплуатационные свойства. Чтобы не допустить уменьшения твердости поверхностного слоя обрабатываемых деталей и тем более образования температурных дефектов на их поверхностях при шлифовании, необходимо управлять теплонапряженностью процесса, исключать превышение температурой шлифования предельных значений. Поэтому поиск путей уменьшения температуры шлифования (при одновременном увеличении производительности обработки) является актуальной задачей, имеющей большое теоретическое и практическое значение.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время разработана формализованная математическая теория тепловых процессов при шлифовании [1, 2]. На основе уравнения теплопроводности Лапласа аналитически описаны стационарные и нестационарные тепловые поля, возникающие в обрабатываемой детали при шлифовании. Установлено, что основным путем снижения тепловой напряженности процесса шлифования является повышение режущей способности круга и выбор оптимальных режимов шлифования, применение эффективных методов правки круга, прерывистого шлифования, использования эффективных технологических сред и т. д. Данные вопросы в научно-технической литературе достаточно полно изучены и получили широкое применение на практике. Вместе с тем, остается нерешенным вопрос о том, какой из схем шлифования (многопроходного или глубинного) следует отдать предпочтение с точки зрения уменьшения температуры шлифования и повышения производительности обработки. Это связано с отсутствием общего теоретического решения об определении температуры шлифования, справедливого как для многопроходного, так и глубинного шлифования. Поэтому важно его получить.

**Цель работы** – определение условий уменьшения температуры шлифования и повышения производительности обработки на основе температурного критерия.

**Изложение основных материалов.** Воспользуемся результатами теоретических исследований температуры шлифования, полученными на основе решения уравнения баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемый материал при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью  $V_{рез}$  (рис. 1) [3]:

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \int_0^{\tau} \theta(\tau) \cdot d\tau + \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2}{2 \cdot N} \cdot [\theta(\tau)]^2 = N \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $\theta(\tau)$  – температура шлифования, К;  $N = q \cdot S$  – мощность теплового источника, Вт;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $q = \sigma \cdot V_{рез}$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup> (энергоемкость обработки, Дж/м<sup>3</sup>);  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Решение уравнения (1):

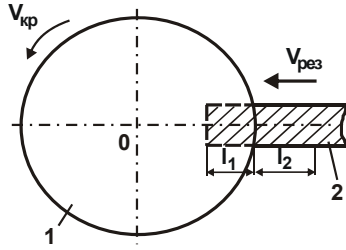


Рис. 1. Расчетная схема процесса шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к кругу: 1 – круг; 2 – образец.

$$\theta(\tau) = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z, \quad (2)$$

где  $z$  – относительная величина температуры ( $0 \dots 1$ ) определяется из уравнения  $\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot l_1 \cdot V_{рез} = -\ln(1-z) - z$ ;  $l_1$  – толщина слоя снятого материала, м.

Теоретически установлено, что с уменьшением скорости  $V_{рез}$  во времени температура шлифования снижается. Это открывает новые возможности в интенсификации процесса шлифования и обеспечения высококачественной обработки, в особенности при глубинном шлифовании, рассматривая снимаемый припуск в виде

пакета элементарных адиабатических стержней (рис. 2 [1]), которые перерезаются кругом с уменьшающейся во времени скоростью  $V_{рез}$ . Для определения температуры шлифования в случае движения образца с переменной (уменьшающейся во времени)

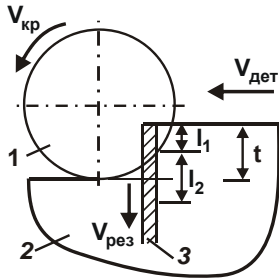


Рис. 2. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень.

скоростью  $V_{рез}$ , требуется составить новое уравнение баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемый материал, аналогично интегральному уравнению (1). Поэтому уточним известное решение [3].

Первоначально рассмотрим процесс шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к кругу с переменной скоростью  $V_{рез}(\tau) = V_{рез0} - \alpha \cdot \tau$ , где  $V_{рез0}$  – начальная скорость перемещения образца, м/с;  $\alpha$  – постоянная величина, м/с<sup>2</sup> (рис. 3). Затем полученные решения распространим для круглого шлифования.

При шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к кругу с переменной скоростью  $V_{рез}(\tau)$ , мощность теплового источника

$N(\tau) = S \cdot \sigma \cdot V_{рез}(\tau)$  в уравнении (1) следует рассматри-

вать функцией от времени обработки  $\tau$ . Тогда уравнение (1) примет вид

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

После преобразований уравнение (3) выразится:

$$\int_0^{\tau} V_{рез}(\tau) \cdot [\sigma - c \cdot \rho \cdot \theta(\tau)] \cdot d\tau = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S}{2 \cdot N(\tau)} \cdot [\theta(\tau)]^2. \quad (4)$$

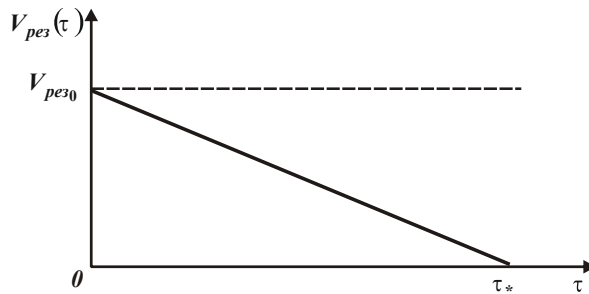


Рис. 3. Характер изменения скорости перемещения образца  $V_{рез}(\tau)$  во времени  $\tau$ .

Как установлено, при шлифовании  $z \ll 1$ , тогда, исходя из зависимости (2), справедливо условие  $\sigma > c \cdot \rho \cdot \theta(\tau)$  и вторым слагаемым в подинтегральном выражении уравнения (4) можно пренебречь. Это существенно упрощает решение уравнения (4), которое после преобразований с учетом  $V_{рез}(\tau) = V_{рез0} - \alpha \cdot \tau$  принимает вид:

$$\left( V_{рез0} \cdot \tau - \frac{\alpha}{2} \cdot \tau^2 \right) \cdot (V_{рез0} - \alpha \cdot \tau) = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2 \cdot \sigma^2} \cdot [\theta(\tau)]^2. \quad (5)$$

Откуда определена температура шлифования  $\theta(\tau)$ :

$$\theta(\tau) = \sigma \cdot V_{рез0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\tau}{V_{рез0}} \right) \cdot \left( 1 - \alpha \cdot \frac{\tau}{V_{рез0}} \right) \cdot \tau}. \quad (6)$$

Очевидно, имеет место экстремум функции  $\theta(\tau)$  от времени обработки  $\tau$ . Подчиним функцию  $\theta(\tau)$  необходимому условию экстремума  $\theta'(\tau) = 0$ :

$$\left( \frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}} \right)^2 - 2 \cdot \left( \frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}} \right) + \frac{2}{3} = 0. \quad (7)$$

В результате приходим к квадратному уравнению относительно неизвестной величины  $\tau$ . Решая его, имеем

$$\frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}} = 1 \pm \sqrt{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Так как  $\frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}} \leq 1$ , то в решении (8) необходимо принять знак "минус". Тогда

$$\frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}} = 0,422 \quad \text{или} \quad \tau_{экстр} = 0,422 \cdot \frac{V_{рез0}}{\alpha}, \quad (9)$$

где  $\tau_{экстр}$  – экстремальное значение времени обработки  $\tau$ .

Общее время обработки определяется из условия  $V_{рез}(\tau) = V_{рез0} - \alpha \cdot \tau = 0$  и равно  $\tau_* = \frac{V_{рез0}}{\alpha}$ . Следовательно, экстремальное значение  $\tau_{экстр}$  составляет приблизительно половину общего времени обработки. При этом в точке экстремума функции  $\theta(\tau)$  выполняется условие:  $V_{рез}(\tau)/V_{рез0} = 0,577$ .

Проведем исследование функции  $\theta(\tau)$ , для чего представим (6) в виде:

$$\frac{\theta(\tau)}{\sigma \cdot V_{рез0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{рез0}}{\alpha}}} = \sqrt{\left( 1 - \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\tau}{V_{рез0}} \right) \cdot \left( 1 - \alpha \cdot \frac{\tau}{V_{рез0}} \right) \cdot \frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}}}. \quad (10)$$

Обозначим

$$\bar{\theta}(\tau) = \frac{\theta(\tau)}{\sigma \cdot V_{рез0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{рез0}}{\alpha}}}. \quad (11)$$

Тогда зависимость (10) опишется:

$$\bar{\theta}(\tau) = \sqrt{\left( 1 - \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\tau}{V_{рез0}} \right) \cdot \left( 1 - \alpha \cdot \frac{\tau}{V_{рез0}} \right) \cdot \frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}}}. \quad (12)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (12) значения относительной величины  $\bar{\theta}(\tau)$ . Как видно, в точке экстремума функции  $\bar{\theta}(\tau)$ , т. е. при условии

$\frac{\alpha \cdot \tau_{экстр}}{V_{рез0}} = 0,422$ , имеет место максимум. При  $\tau = 0$  и  $\frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}} = 1,0$  функция  $\bar{\theta}(\tau)$  принимает нулевые значения. На рис. 4 в общем виде показан характер изменения во времени функции  $\bar{\theta}(\tau)$ .

Таблица 1

Расчетные значения относительной величины  $\bar{\theta}(\tau)$

$\frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}}$	0	0,2	0,422	0,8	1,0
$\bar{\theta}(\tau)$	0	0,38	0,44	0,31	0

Исходя из зависимости (6), определим максимальную температуру шлифования при условии  $\tau = \tau_{экстр} = 0,422 \cdot \frac{V_{рез0}}{\alpha}$ :

$$\theta_{max} = 0,675 \cdot \sigma \cdot V_{рез0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_{экстр}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (13)$$

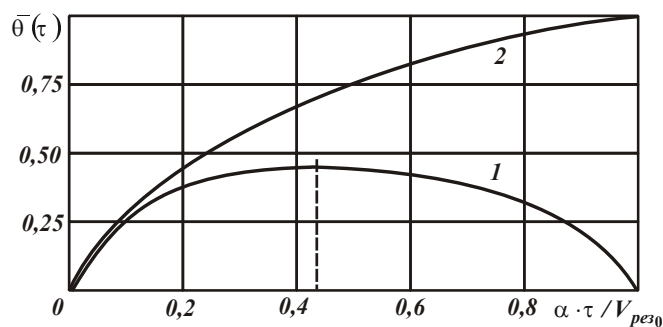


Рис. 4. Характер изменения во времени функции  $\bar{\theta}(\tau)$ : 1 – шлифование с уменьшающейся во времени скоростью перемещения образца  $V_{рез}(\tau)$ ; 2 – шлифование с постоянной во времени скоростью перемещения образца.

При условии  $\alpha = 0$ , соответствующему шлифование с постоянной скоростью  $V_{рез}(\tau) = V_{рез0}$ , зависимость (6) примет вид:

$$\theta(\tau) = \sigma \cdot V_{рез0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (14)$$

С учетом зависимости (11), получим

$$\bar{\theta}(\tau) = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}}}. \quad (15)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные по зависимости (15) значения  $\bar{\theta}(\tau)$ .

Таблица 2

Расчетные значения относительной величины  $\bar{\theta}(\tau)$

$\frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}}$	0	0,2	0,422	0,8	1,0
$\bar{\theta}(\tau)$	0	0,45	0,65	0,89	1,0

В данном случае с течением времени обработки  $\tau$  температура шлифования непрерывно увеличивается, принимая наибольшее значение при  $\frac{\alpha \cdot \tau}{V_{рез0}} = 1$  (рис. 4).

Сравнивая значения относительной величины  $\bar{\theta}(\tau)$ , приведенные в табл. 1 и табл. 2, видно, что при шлифовании с переменной (уменьшающейся во времени) скоростью  $V_{рез}(\tau)$  температура шлифования меньше, чем при шлифовании с постоянной скоростью. Причем, при условии  $\tau > \tau_{экстр}$  наблюдается противоположный характер изменения температуры с увеличением времени обработки  $\tau$ .

Из рис. 4 следует, что с точки зрения уменьшения температуры шлифования необходимо реализовать следующие условия:  $\tau < \tau_{экстр}$  и  $\tau > \tau_{экстр}$ . Первый случай предполагает осуществление съема припуска частями, а второй случай – непрерывно с уменьшающейся во времени скоростью перемещения образца (вплоть до нуля). В данном случае максимум температуры шлифования достигается не в конце, а в середине шлифования. Это указывает на то, что основная часть тепла уходит в образующиеся стружки, а в обрабатываемую деталь уходит весьма малая часть тепла. В результате резко снижается температура и фактически исключается возможность образования на обрабатываемой поверхности температурных дефектов.

Реализовать на практике первое условие ( $\tau < \tau_{экстр}$ ) можно при круглом наружном (внутреннем) или плоском многопроходном шлифовании – с относительно небольшой глубиной шлифования и достаточно большой скоростью детали. Реализовать второе условие ( $\tau > \tau_{экстр}$ ) можно, во-первых, при шлифовании по схеме выхаживания, а во-вторых, при глубинном шлифовании (рис. 2), рассматривая снимаемый припуск в виде пакета бесконечно тонких адиабатических стержней, которые (как установлено расчетами) перерезаются в процессе шлифования с уменьшающейся во времени скоростью  $V_{рез}(\tau)$ . Следовательно, максимальная температура шлифования достигается не на уровне обработанной поверхности, а выше – в слое снимаемого припуска. Это указывает на то, что фактически все тепло уходит в стружки, а в обрабатываемую деталь уходит небольшая часть тепла. В результате температура поверхностного слоя детали при глубинном шлифовании может быть небольшой, что будет способствовать повышению качества обработки. Собственно этим можно объяснить то, что в экономически развитых странах метод глубинного шлифования в металлообработке получил большое применение. Установлено, что данный метод обеспечивает съем больших припусков, позволяет совместить черновую и чистовую обработку в одну операцию, исключая процессы резания лезвийными инструментами, и таким образом повышая производительность и качество обработки.

Проведем анализ закономерностей изменения параметров  $l_1(\tau)$  и  $l_2(\tau)$  при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с переменной скоростью  $V_{рез}(\tau) = V_{рез0} - \alpha \cdot \tau$ :

$$l_1(\tau) = \int_0^{\tau} V_{рез}(\tau) \cdot d\tau = \int_0^{\tau} (V_{рез0} - \alpha \cdot \tau) \cdot d\tau = V_{рез0} \cdot \tau - \frac{\alpha}{2} \cdot \tau^2 . \quad (16)$$

При условии  $\tau = V_{рез0} / \alpha$ , т. е. когда  $V_{рез}(\tau) = 0$ , параметр  $l_1(\tau)$  равен

$$l_1 = 0,5 \cdot \frac{V_{рез0}^2}{\alpha} . \quad (17)$$

В точке экстремума температуры шлифования, т. е. при условии  $\tau_{экстр} = 0,422 \cdot V_{рез0} / \alpha$ , параметр  $l_1(\tau)$  определится

$$l_1 = 0,333 \cdot \frac{V_{рез0}^2}{\alpha} . \quad (18)$$

Таким образом, экстремум температуры шлифования достигается на удалении, составляющем 67 % снимаемого припуска, определяемого зависимостью (17).

Как известно, между плотностью теплового потока  $q(\tau)$ , температурой шлифования  $\theta(\tau)$  и глубиной  $l_2(\tau)$  проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемого материала существует связь:

$$q(\tau) = \lambda \cdot \frac{\theta(\tau)}{l_2(\tau)} . \quad (19)$$

Используя зависимость (16), с учетом  $q(\tau) = \sigma \cdot V_{рез}(\tau)$ ;  $V_{рез}(\tau) = V_{рез0} - \alpha \cdot \tau$  и зависимости (6), можно определить параметр  $l_2(\tau)$  при шлифовании образца, движущегося по нормали к кругу с уменьшающейся во времени скоростью  $V_{рез}(\tau)$ :

$$l_2(\tau) = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\tau}{V_{рез0}}\right)}{\left(1 - \alpha \cdot \frac{\tau}{V_{рез0}}\right)}} \cdot \tau . \quad (20)$$

С увеличением  $\tau$  знаменатель зависимости (20) будет уменьшаться с большей интенсивностью, чем числитель, вызывая неограниченное увеличение параметра  $l_2(\tau) \rightarrow \infty$ . Следовательно, чем больше  $\tau$ , тем больше параметр  $l_2(\tau)$ , несмотря на то, что температура шлифования при этом стремится к нулю (рис. 4). Из этого можно заключить, что при глубинном шлифовании уменьшение температуры будет сопровождаться увеличением глубины  $l_2(\tau)$  проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемого материала. Установленная закономерность подтверждается известными экспериментальными данными, согласно которым при относительно небольшой температуре шлифования наблюдалось существенное увеличение глубины  $l_2(\tau)$  проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемого материала.

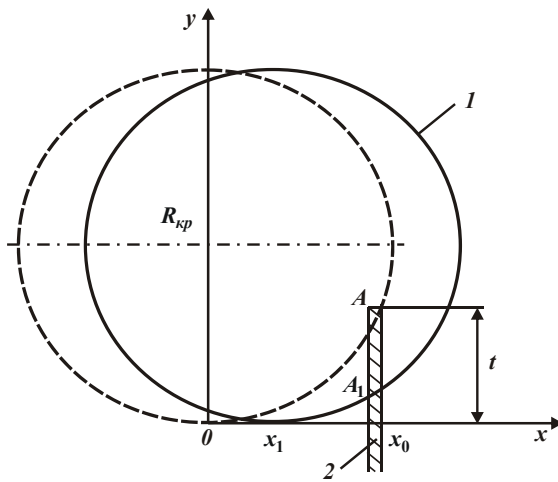


Рис. 5. Схема взаимного расположения круга (1) и адиабатического стержня (2).

Произведем расчет температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при глубинном шлифовании. Определим характер изменения во времени скорости  $V_{рез}(\tau)$  при плоском шлифовании (рис. 2) по аналогии с известным решением [3]. Для этого рассмотрим процесс перерезания адиабатических стержней, которыми условно представлен снимаемый припуск. Предположим, что в начальный момент обработки круг контактирует с адиабатическим стержнем в точке А (рис. 5).

По мере перемещения круга вдоль оси  $ox$  со скоростью  $V_{дет}$  точка контакта круга со стержнем примет положение точки  $A_1$ . Для определения скорости перемещения точки А в положение точки  $A_1$ , т. е. скорости перерезания адиабатического стержня  $V_{рез}(\tau)$ , воспользуемся уравнением окружности, описывающей наружную поверхность круга радиусом  $R_{кр}$  в плоскости с координатами  $x$  и  $y$ :

$$(x - x_1)^2 + (y - R_{кр})^2 = R_{кр}^2 , \quad (21)$$

где  $x_1 = V_{\text{дем}} \cdot \tau$  – текущая координата положения центра круга, м.

Предположим, что положение адиабатического стержня соответствует условию  $x = x_0$ . Тогда координата  $y$  положения точки  $A_1$  определится из уравнения (21):

$$(x_0 - x_1)^2 + (y - R_{\text{кр}})^2 = R_{\text{кр}}^2, \quad \text{откуда} \quad (22)$$

$$y = R_{\text{кр}} + \sqrt{R_{\text{кр}}^2 - (x_0 - V_{\text{дем}} \cdot \tau)^2}, \quad (23)$$

$$V_{\text{рез}}(\tau) = y'_\tau = \frac{V_{\text{дем}} \cdot (x_0 - V_{\text{дем}} \cdot \tau)}{\sqrt{R_{\text{кр}}^2 - (x_0 - V_{\text{дем}} \cdot \tau)^2}}. \quad (24)$$

В первом приближении вторым слагаемым в подкоренном выражении знаменателя можно пренебречь, т. к.  $R_{\text{кр}} \gg x_0$ , тогда

$$V_{\text{рез}}(\tau) = \frac{V_{\text{дем}}}{R_{\text{кр}}} \cdot (x_0 - V_{\text{дем}} \cdot \tau). \quad (25)$$

Как видно, с течением времени обработки  $\tau$  скорость перерезания адиабатического стержня  $V_{\text{рез}}(\tau)$  непрерывно уменьшается (вплоть до нуля). В результате пришли к рассмотренному выше случаю шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с переменной (уменьшающейся во времени) скоростью  $V_{\text{рез}}(\tau) = V_{\text{рез0}} - \alpha \cdot \tau$ . При плоском шлифовании

$V_{\text{рез0}} = V_{\text{дем}} \cdot \frac{x_0}{R_{\text{кр}}}$ ;  $\alpha = \frac{V_{\text{дем}}^2}{R_{\text{кр}}}$ . Параметр  $x_0$  можно определить из уравнения (22) при

выполнении условий  $x_1 = 0$  и  $y = t$  (где  $t$  – глубина шлифования, м):

$$x_0 = \sqrt{2 \cdot R_{\text{кр}} \cdot t}. \quad (26)$$

Подставляя зависимость (26) в (25), имеем

$$V_{\text{рез}}(\tau) = V_{\text{дем}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{\text{кр}}} - \frac{V_{\text{дем}}^2}{R_{\text{кр}}} \cdot \tau}. \quad (27)$$

$$\text{Соответственно } V_{\text{рез0}} = V_{\text{дем}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{\text{кр}}}}; \quad \alpha = \frac{V_{\text{дем}}^2}{R_{\text{кр}}}; \quad \frac{V_{\text{рез0}}}{\alpha} = \frac{R_{\text{кр}}}{V_{\text{дем}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{кр}}}{2 \cdot t}}.$$

Максимальная температура шлифования  $\theta_{\text{max}}$  определяется зависимостью (13):

$$\theta_{\text{max}} = 0,621 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot V_{\text{дем}} \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{\text{кр}}}}}. \quad (28)$$

Как видно, параметр  $\theta_{\text{max}}$  тем больше, чем больше скорость детали  $V_{\text{дем}}$  и меньше глубина шлифования  $t$ . Однако, при условии обеспечения заданной удельной производительности обработки  $Q_{\text{уд}} = V_{\text{дем}} \cdot t$  с точки зрения уменьшения  $\theta_{\text{max}}$  эффективно скорость детали  $V_{\text{дем}}$  увеличивать, а глубину шлифования  $t$  уменьшать.

Определим температуру поверхностного слоя обрабатываемой детали при глубинном шлифовании, используя рис. 6. Как следует из рисунка, при изменении параметра  $l_1$  в пределах от 0 до глубины шлифования  $t$  температура шлифования  $\theta$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку максимума. Казалось бы, что при условии  $l_1 = t$  температура шлифования  $\theta$  равна нулю. Однако в действительности это не так. Вследствие теплопроводности обрабатываемого материала в момент достижения максимальной температуры  $\theta_{\text{max}}$  глубина проникновения тепла вглубь обрабатываемой детали  $l_2$  превышает глубину шлифования  $t$ . Поэтому на уровне  $t$  температура шлифования  $\theta$  (определяющая температуру поверхностного слоя обрабатываемой детали) больше нуля и будет изменяться в пределах  $0 \dots \theta_{\text{max}}$ .

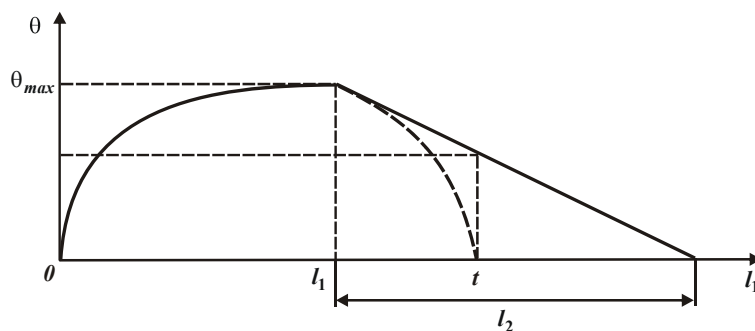


Рис. 6. Изменение температуры шлифования  $\theta$  вдоль адиабатического стержня.

В работе [4] показано, что температура  $\theta$  поверхностного слоя обрабатываемой детали определяется по зависимости:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \frac{(l_2 - t)}{l_2}. \quad (29)$$

Данная зависимость логически вытекает из рис. 6. Здесь параметр  $l_2$  выражается зависимостью (20) для условия  $\tau_{экстр} = 0,422 \cdot \frac{V_{рез0}}{\alpha}$ , т. е. для условия экстремума (максимума) температуры шлифования  $\theta$ . после преобразований (29), получено:

$$\theta = \frac{0,96 \cdot \sigma}{\lambda \cdot \sqrt{R_{кр}}} \cdot \left( 1,088 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \sqrt{R_{кр} \cdot t \cdot Q_{yd}} - \sqrt{t} \cdot Q_{yd} \right), \quad (30)$$

где  $Q_{yd} = t \cdot V_{дет}$  – удельная производительность обработки,  $m^3/(c \cdot m)$ .

В итоге установлена аналитическая зависимость для определения температуры  $\theta$  поверхностного слоя обрабатываемой детали. Как видно, температура  $\theta$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку максимума (рис. 7). Уменьшить ее можно двумя путями, реализуя левую и правую ветви данной зависимости за счет применения многопроходного шлифования (с небольшой глубиной шлифования) и глубинного шлифования (с глубиной шлифования на уровне 10 мм и более).

Учитывая, что во втором случае реализовать такие большие глубины шлифования можно лишь в особых условиях (например, при разрезке материалов, вышлифовке глубоких пазов и канавок), применение глубинного шлифования ограничено. Однако здесь имеется в виду глубинное (плоское или круглое) шлифование с долевой продольной подачей  $S_d = 1$ , т. е., по сути, всей шириной круга. Глубинное продольное шлифование с долевой продольной подачей  $S_d < 1$  и относительно большой скоростью детали  $V_{дет}$  (такой же как и при обычном многопроходном шлифовании), реализующее левую ветвь зависимости (рис. 3), вполне может быть осуществлено. Это связано с образованием на рабочей поверхности круга заборного конуса и возможности реализации небольшой глубины шлифования  $\Delta t$  (приходящейся на один оборот обрабатываемой детали), т. е. такой же глубины шлифования, как и при многопроходном шлифовании с относительно большой скоростью детали  $V_{дет}$ . Недостатком данной схемы глубинного шлифования является увеличение максимальной толщины среза зернами круга  $H_{max}$ , что приводит к повышенному износу круга. В этом плане более эффективной схемой является глубинное шлифование с относительно небольшой скоростью детали  $V_{дет}$  и долевой продольной подачей  $S_d = 1$ . Однако, исходя из рис. 7, в связи с высокой тепловой напряженностью данная схема шлифования может быть эффективно использована лишь при глубине шлифования 10 мм и более. Для того чтобы реализовать данную схему шлифования при меньших глубинах шлифования необходимо, согласно зависимости (30), уменьшить темпера-



туру поверхностного слоя обрабатываемой детали  $\theta$  можно лишь за счет уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$  (энергоемкости обработки).

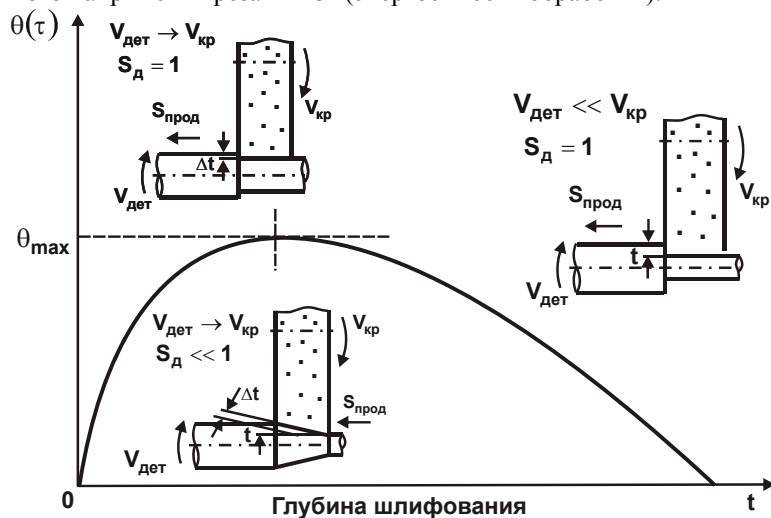


Рис. 7. Расположение трех принципиальных схем шлифования по уровню достигаемой температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали  $\theta(\tau)$ .

### Выводы

Получено новое уточненное теоретическое решение о характере изменения температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали при круглом шлифовании. Установлено, что также как и в известном аналогичном решении, температура поверхностного слоя обрабатываемой детали с изменением глубины шлифования для заданной удельной производительности обработки изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку максимума. Из этого следует, что уменьшить температуру поверхностного слоя обрабатываемой детали можно двумя путями, реализуя левую и правую ветви указанной зависимости за счет применения соответственно многопроходного шлифования (с относительно небольшой глубиной шлифования) и глубинного шлифования (с глубиной шлифования на уровне 10 мм и более). Показано, что основным путем уменьшения температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали следует рассматривать применение круглого многопроходного шлифования с относительно большой скоростью детали или же круглого глубинного шлифования с относительно большой скоростью детали и небольшой долевой продольной подачей.

### Список использованных источников

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. 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.
4. Новиков Ф.В. Математическая модель определения температуры при глубинном шлифовании / Ф.В. Новиков, О.С. Кленов // Резание и инструмент в технологических системах: Междуна. научн.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2009. – Вып. 76. – С. 133-141.

Статья поступила 12.04.2012 г.

