

**ВЛИЯНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ШЛИФОВАНИЯ**

© 2015

**Н.В. Лищенко**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и материаловедение»  
*Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса (Украина)*

**В.П. Ларшин**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
*Одесский национальный политехнический университет, Одесса (Украина)*

**Ключевые слова:** математическая модель; температура шлифования; метод суперпозиции; смазочно-охлаждающая жидкость; принудительное охлаждение; граничные условия.

**Аннотация:** Получены одномерные по координате математические модели для определения температурного поля при шлифовании по глубине поверхностного слоя и во времени, которые учитывают охлаждение двух видов: за счет теплопроводности обрабатываемого материала при отсутствии нагрева и за счет охлаждающего воздействия смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на обработанную поверхность. В первом случае – при граничных условиях второго рода на этапе нагрева и применении метода суперпозиции тепловых полей, во втором – при граничных условиях второго и третьего рода в зоне нагрева и охлаждения, соответственно. Для второго случая (принудительное охлаждение) это позволило устранить известное противоречие, характерное для двумерной модели температурного поля, когда на этапе нагрева одновременно действовали граничные условия второго и третьего рода. В данной модели охлаждение обусловлено не только отсутствием нагрева в зоне охлаждения, но также теплообменом между обработанной (нагретой) поверхностью и СОЖ, причем СОЖ в указанной модели температуры имеет учитываемую при охлаждении собственную температуру. Распределение температуры по глубине поверхностного слоя в момент окончания этапа нагрева является начальным условием для определения температурного поля на этапе охлаждения в любой момент времени, отсчитываемого от окончания этапа нагрева. Установлено влияние охлаждающего воздействия СОЖ не только на температуру поверхности, но также на ее распределение по глубине поверхностного слоя в любой момент времени. Подтверждено, что на этапе охлаждения температура в глубинных слоях материала может превышать температуру вышележащих слоев, т. е. имеет место изменение направления теплового потока, которое оказывает влияние на характер структурно-фазовых превращений материала поверхностного слоя.

**ВВЕДЕНИЕ**

При шлифовании причиной появления структур вторичной закалки или отпуска в поверхностном слое обрабатываемой заготовки является высокая температура в зоне контакта. Для управления свойствами поверхностного слоя при шлифовании необходима математическая модель процесса, позволяющая установить влияние отдельных его параметров на температурное поле в зоне обработки и за ее пределами. Теплофизика технологических процессов развивается в двух направлениях: решение задач без учета теплообмена с окружающей средой (шлифование всухую) и с учетом теплообмена, когда обработанный участок поверхности охлаждается за счет смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). С единых позиций следует рассмотреть оба направления.

Особенностью первого является возможность использования принципа суперпозиции температурных полей от действия на обрабатываемую поверхность разных тепловых источников. При шлифовании с охлаждением этот принцип не действует, что осложняет решение задачи о температурном поле. Вопрос о влиянии охлаждения на температурное поле при шлифовании рассматривается, начиная с шестидесятих годов прошлого века. Актуальность его значительно возросла по мере появления современных смазочно-охлаждающих технологических средств [1] и новых способов их доставки в зону резания и для охлаждения заготовки. Сухое шлифование, шлифование с экономным расходом СОЖ (и других видов смазочных средств) или подача СОЖ под давлением – все эти вопросы требуют научного решения задачи об охлаждении, по-

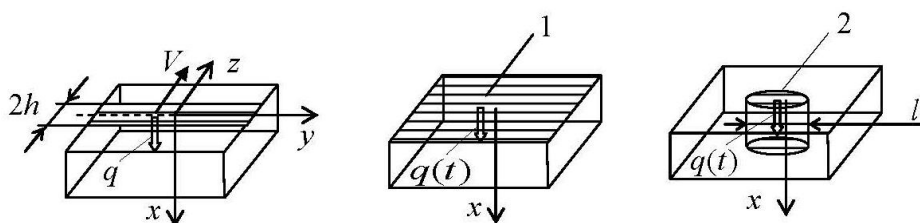
скольку в зоне резания одновременно протекает несколько физических процессов [2], но тепловой процесс относится к доминирующим [3]. Основы теплофизики процессов механической обработки, рассмотренные в работах [4; 5], не в полной мере учитывают особенности процессов шлифования в связи со значительно меньшей толщиной снимаемого припуска.

Основные теоретические исследования в этой области приведены в работах научной школы профессора А.В. Якимова [6–9]. Итоги этих исследований по влиянию принудительного охлаждения приведены в работе [10]. Некоторое развитие вопроса имеется в работах Д.Г. Евсеева [11; 12], однако вопросу принудительного охлаждения не уделено должного внимания. В этой связи целью работы является получение математической модели для определения температуры шлифования с учетом охлаждающего воздействия СОЖ и ее температуры.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Моделирование температурного поля обычно производят на основе теплофизической схемы теплового процесса (рис. 1). Наиболее распространена теплофизическая схема – подвижный полосовой источник тепла (рис. 1 а).

В соответствии с этой схемой по адиабатической поверхности  $x=0$  полуограниченного тела в направлении оси  $z$  движется со скоростью  $V$  бесконечно длинный (по оси  $y$ ) полосовой источник тепла шириной  $2h$  [10; 11]. Плотность теплового потока в пределах теплового источника принимают равной постоянной величине  $q$ . Теплообмен адиабатической поверхности



**Рис. 1.** Схема подвижного (а) и неподвижного (б, в) источника тепла (в заштрихованной зоне имеют место граничные условия второго рода): 1, 2 – плоские торцы полуограниченного в направлении оси  $x$  тела (б) и тонкого адиабатического стержня (в), соответственно

с окружающей средой отсутствует. Передача тепловой энергии в направлении координаты  $x$  (глубинные слои) и  $z$  (в направлении движения источника) осуществляется за счет теплопроводности, т.е. теплообмен с окружающей средой отсутствует. Решение тепловой задачи для данной теплофизической схемы (рис. 1 а) впервые получено применительно к так называемому скользящему контакту (термин Д. Егера в работе [13]), представляющему собой «полосовой источник тепла» (термин, принятый позднее в литературе). Применительно к шлифованию эта модель была усовершенствована [10; 14]. Результатом решения этой теплофизической задачи является уравнение, описывающее температурное поле от подвижного полосового источника [10]:

$$T(Z, X, H) = \frac{2qa}{\pi\lambda V} \int_{z-H}^{z+H} \exp(-\xi) K_0\left(\sqrt{X^2 + \xi^2}\right) d\xi, \quad (1)$$

$$\xi = \frac{V(z-z')}{2a}; \quad X = \frac{Vx}{2a}; \quad Z = \frac{Vz}{2a}; \quad H = \frac{Vh}{2a},$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  
 $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·°С);  
 $V$  – скорость движения источника тепла в направлении оси  $z$  (рис. 1 а), м/с;  
 $K_0$  – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка;  
 $H$  – безразмерная полуширина источника тепла;  
 $X$  – безразмерная координата;  
 $h$  – полуширина источника тепла, м;  
 $x$  – размерная координата, направленная по глубине поверхностного слоя, м;  
 $z = z' - V\tau'$  – размерная координата в направлении вектора скорости источника тепла, причем в зоне контакта  $0 \leq |z| \leq h$ , м;  
 $z'$  – дополнительная переменная, м;  
 $\tau'$  – время, определяющее координату  $z$  в квазиустановившемся температурном процессе, с.

Уравнение (1) не позволяет учитывать влияние принудительного охлаждения на температурное поле при шлифовании, оно достаточно сложное для использования в системах технологической диагностики. Попытка учесть влияние СОЖ [10; 15] позволила получить только приближенное решение. Сложность задачи обусловлена необходимостью учесть одновременно граничные

условия второго и третьего рода – условий теплообмена на поверхности тела. В зоне контакта действуют граничные условия второго рода, т. е. задается тепловой поток, а за пределами этой зоны, куда попадает СОЖ, действуют граничные условия третьего рода, т. е. задаются условия конвективного теплообмена. Как следствие, тепловая задача характеризуется разрывными (неоднородными) граничными условиями, для учета которых необходимо применять специальные математические приемы. Полученное в работе [10] решение имеет ряд недостатков: не оценена погрешность принятых допущений, не учитывается влияние температуры СОЖ на температуру шлифования. В этом решении охлаждающее действие СОЖ учитывается только через коэффициент теплообмена  $\alpha$ , температура СОЖ принята равной нулю на этапе постановки задачи [10; 15].

Предлагается новый подход к определению температуры шлифования на поверхности и по глубине поверхностного слоя. Сущность этого подхода заключается в следующем. Температурный цикл шлифования разбивается на два последовательных этапа во времени, как это в действительности имеет место при шлифовании. На первом этапе происходит нагрев обрабатываемой поверхности в течение времени воздействия источника тепла с плотностью теплового потока  $q$ . На втором этапе, начальные условия для которого создаются на этапе нагрева, происходит охлаждение обработанной поверхности за счет теплопроводности или в условиях ее конвективного теплообмена с СОЖ. Для реализации подхода необходимо разработать единую математическую модель температурного цикла шлифования, включающего этапы нагрева и охлаждения поверхности, а также исследовать по этой модели влияние принудительного охлаждения (за счет воздействия СОЖ) на распределение температуры по глубине поверхностного слоя.

Ближайшим аналогом рассмотренной двумерной теплофизической модели, на основе которой получено уравнение (1), является одномерная теплофизическая модель процесса (рис. 1 б). В соответствии с этой моделью постоянный по величине тепловой поток  $q(t)$  действует на плоской граничной поверхности полубесконечного тела в течение ограниченного времени нагрева  $0 \leq t \leq t_H$ , где  $t_H = \frac{2h}{V}$ . Это время точно равно времени прохождения «теплосоздающей» полосы шириной  $2h$  со скоростью  $V$  над исследуемой точкой шлифуемой поверхности [16], т. е.

$$q(t) = \begin{cases} q, & \text{если } 0 \leq t \leq t_H; \\ 0, & \text{если } t_H \leq t \leq \infty. \end{cases} \quad (2)$$

Особенностью этой модели является возможность замены ограниченного по ширине плоского полосового источника тепла (рис. 1 а) плоским торцом полубесконечного твердого тела (рис. 1 б), на котором столько же времени ( $0 \leq t \leq t_H$ ) действует неподвижный источник тепла [17–19]. Причем площадь плоского торца может быть либо не ограничена (заштрихованная зона 1 на рис. 1 б), либо ограничена площадью плоского торца вертикального стержня (заштрихованная зона 2 на рис. 1 в). Габаритный размер  $l$  этого стержня (рис. 1 в) при любой конфигурации его торца может быть уменьшен до величины, при которой в направлении оси  $x$  стержня направлен «линейный» тепловой поток  $q(t)$  в интервале времени  $0 \leq t \leq t_H$ . Слово «линейный» (по терминологии работы [19]) означает, что вектор  $q(t)$  теплового потока в любой точке стержня параллелен оси  $x$ . Предполагается, что площадь зоны 2 с габаритным размером  $l$  составляет меньшую часть площади зоны 1. Причем такую часть, при которой искажение «линейности» теплового потока по глубине рассматриваемого поверхностного слоя отсутствует (линии теплового потока перпендикулярны торцу и параллельны оси  $x$ ).

Уравнение, описывающее одномерное температурное поле  $T(x, t)$  на интервале времени нагрева  $0 \leq t \leq t_H$ , имеет вид [16; 19]:

$$T_{\text{НАГР}}(x, t) = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad (3)$$

где  $t$  – время действия неподвижного источника тепла (время нагрева обрабатываемой поверхности), причем  $0 \leq t \leq t_H$ , с;

$\operatorname{ierfc}(u)$  – обозначение специальной функции, причем [20]

$$\operatorname{ierfc}(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) - u \cdot \operatorname{erfc}(u),$$

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) \text{ и } \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-u^2) du.$$

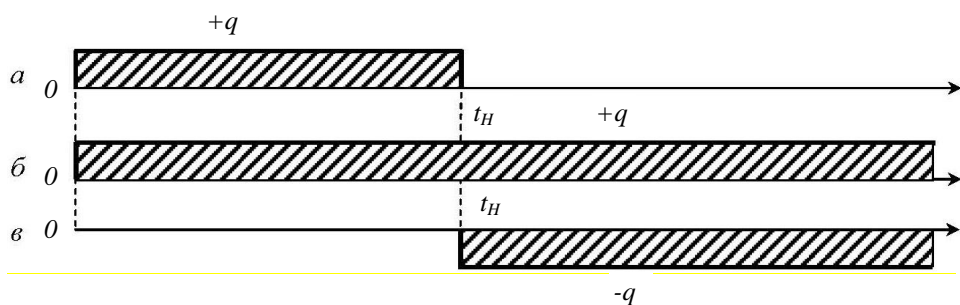


Рис. 2. Замена источника тепла с плотностью теплового потока  $+q$  на интервале времени  $0 \leq t \leq t_H$  (а) на два источника тепла с плотностями теплового потока  $+q$  и  $-q$  на интервалах  $0 \leq t \leq \infty$  и  $t_H \leq t < \infty$  (б, в), соответственно

Для описания температурного поля с помощью одномерного уравнения (3) на интервале времени охлаждения  $t_H \leq t < \infty$ , когда охлаждение поверхности производится только за счет теплопроводности обрабатываемого материала (без СОЖ), предлагается применить принцип суперпозиции (сложения) двух температурных полей от действия двух источников тепла (рис. 2).

Первый тепловой источник с положительной плотностью теплового потока  $+q$  действует в интервале времени  $0 \leq t \leq \infty$  (рис. 2 а), а второй – с отрицательной плотностью теплового потока  $-q$  действует в интервале времени  $t_H \leq t < \infty$  (рис. 2 б). Суперпозиция двух тепловых полей от действия указанных источников тепла равносильна действию одного ограниченного по времени источника тепла – теплового импульса – на интервале времени  $0 \leq t \leq t_H$  (рис. 2 а).

Расчет температуры от действия указанных выше источников тепла на интервалах времени  $0 \leq t < t_H$  (нагрев) и  $t_H \leq t < \infty$  (охлаждение) производят, соответственно, по формулам:

$$T_{\text{НАГР}}(x, t) = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}$$

$$T_{\text{ОХЛ}}(x, t) = \frac{2q}{\lambda} \left[ \left( \sqrt{at} \right) \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} - \left( \sqrt{a(t-t_H)} \right) \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-t_H)}} \right]. \quad (4)$$

Таким образом, одна двумерная математическая модель (1) идентична совокупности двух одномерных математических моделей (4). Отличие вызвано только количеством пространственных координат:  $x, z$  (две пространственные координаты) и  $x$  (одна пространственная координата). Установлено [16], что при шлифовании на этапе нагрева в интервале  $4 \leq H \leq 20$  при расчете максимальных температур на поверхности и по глубине поверхностного слоя, ограниченного уровнем двукратного падения температуры, двумерная модель с уравнением (1) и одномерная модель с уравнением (4) дают результаты, отличающиеся не более чем на 5%. Однако обе эти модели (одномерная и двумерная) не учитывают охлаждающего влияния СОЖ на температуру

шлифования и на ее распределение по глубине поверхностного слоя, поскольку в обоих случаях охлаждение вызвано только отсутствием нагрева, т. е. явлением теплопроводности обрабатываемого материала при отсутствии теплового потока на поверхности.

Очевидно, что распределение температуры по глубине поверхностного слоя в конце этапа нагрева является начальным условием для определения температурного поля на этапе охлаждения. Для определения температуры шлифования  $T_{Oxл}(x,t)$  на этапе охлаждения (с начальными условиями, полученными на этапе нагрева) можно использовать уравнение [19]:

$$T_{Oxл}(x,t) = \int_0^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi at}} \left\{ \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) + \exp\left(-\frac{(x+x')^2}{4at}\right) \right\} - A \exp(atA^2 + A(x+x')) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x+x'}{2\sqrt{at}} + A\sqrt{at}\right) \Big] f(x') dx' + aA \int_0^t \left[ \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}\right)}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} - A \exp(aA^2(t-\tau) + Ax) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} + A\sqrt{a(t-\tau)}\right) \right] \varphi(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Здесь

$$f(x') = \left[ \frac{2q\sqrt{at_H}}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x'^2}{4at_H}\right) - \frac{x'}{2\sqrt{at_H}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x'}{2\sqrt{at_H}}\right) \right] + T_0,$$

где  $t, \tau$  – время охлаждения и переменная интегрирования, соответственно, с;

$A = \frac{\alpha}{a}$  – приведенный коэффициент теплообмена,

Дж/(м<sup>4</sup>·°C);

$\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$T_0$  – температура обрабатываемого материала до шлифования, °C;

$\varphi(\tau)$  – исходная температура СОЖ, которая может изменяться на интервале времени охлаждения  $0 \leq \tau \leq t$ , °C.

Совокупность уравнений (3) и (5) описывает температурное поле при шлифовании на этапах нагрева и охлаждения обрабатываемой поверхности, соответственно, причем уравнение (5), в отличие от уравнения (4), учитывает принудительное охлаждающее действие СОЖ. Единство задачи определения температурного цикла шлифования в составе «нагрев – охлаждение» обеспечивается тем, что температура любой точки поверхности и поверхностного слоя в конце временного этапа нагрева является температурой в начале временного этапа охлаждения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

До сих пор не исследовано температурное поле по уравнению (5), которое имеет ряд особенностей в условиях принудительного охлаждения. Это

уравнение позволяет учесть не только охлаждающие свойства СОЖ, но также ее температуру  $\varphi(\tau)$ , которая может быть постоянной или переменной во времени.

Исследование уравнения (5) проводили в среде MathCAD при следующих исходных данных, характеризующих процесс шлифования:  $a=8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda=42$  Вт/(м·°C);  $q=40 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha=10\,000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\varphi(\tau)=20$  °C. Время нагрева ( $t_H$ ) и охлаждения ( $t$ ) в уравнениях (4) и (5), составляющие вместе единое время цикла шлифования  $t_{\Sigma}$ , на соответствующих этапах шлифования изменяли в одинаковых интервалах:  $0 \leq t_H \leq 0,1$  с (нагрев) и  $0 \leq t \leq 0,1$  с (охлаждение). В едином процессе нагрева и охлаждения (рис. 3) эти интервалы составляют:  $0 \leq t_{\Sigma} \leq 0,1$  с (нагрев) и  $0,1 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2$  с (охлаждение).

Видно, что при  $x=500$  мкм и 1000 мкм температура шлифования ( $T$ , °C) продолжает увеличиваться до максимального значения 560 °C и 370 °C даже на этапе охлаждения, а затем уменьшается.

Возрастание температуры в глубинных слоях материала на этапе охлаждения, т. е. на этапе времени  $0,1 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2$  с, установлено также В.А. Сипайловым при анализе двумерного уравнения, учитывающего теплообмен [10]. Сходство результатов расчета по уравнению (5) и по двумерному уравнению [10; 11] подтверждает правомерность уравнения (5) для описания температурного поля на этапе охлаждения при наличии теплообмена.

Полученная и исследованная математическая модель температурного поля в условиях принудительного охлаждения обрабатываемой поверхности может найти дальнейшее применение для условий нестационарной обработки металлов резанием [21], а также при разработке системы адаптивного управления процессом шлифования по температурному критерию в соответствии с алгоритмами оптимизации процессов механической обработки [22].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена новая методика определения температуры шлифования, в соответствии с которой температуру находят последовательно на этапе нагрева и охлаждения по уравнениям (4) при охлаждении за счет теплопроводности и по уравнениям (3) и (5) – при принудительном охлаждении.

2. Использовано уравнение (5) для определения температуры шлифования во времени и по глубине поверхностного слоя на этапе принудительного охлаждения за счет СОЖ, позволяющее установить влияние постоянной и переменной температуры СОЖ на температурное поле при шлифовании.

3. Разработана единая математическая модель температурного цикла шлифования, содержащего этапы нагрева и охлаждения при граничных условиях второго и третьего рода, соответственно. Это позволило устранить противоречие, характерное для двумерной модели температурного поля, когда на этапе нагрева одновременно действовали граничные условия второго и третьего рода.

4. Исследовано влияние СОЖ на температуру шлифования и ее распределение по глубине поверхностного слоя.

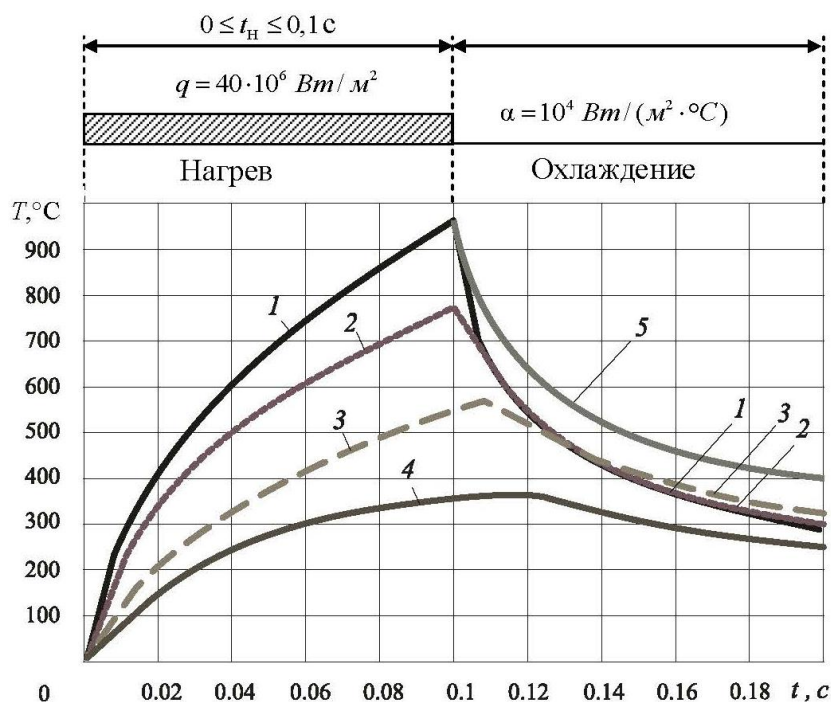


Рис. 3. Изменение температуры шлифования  $T, ^\circ\text{C}$  во времени ( $0 \leq t_\Sigma \leq 0,2$  с) на этапах нагрева ( $0 \leq t_H \leq 0,1$  с) и охлаждения ( $0,1 \leq t_\Sigma \leq 0,2$ ): 1, 2, 3, 4— $x=0, 200, 500, 1000$  мкм при  $\alpha=10^4$  Вт/(м $^2$ ·°C); 5— $x=0$  при  $\alpha=0$

5. Подтверждено, что на этапе охлаждения температура в глубинных слоях материала может превышать температуру вышележащих слоев, т. е. имеет место изменение направления теплового потока, которое оказывает влияние на характер структурно-фазовых превращений материала поверхностного слоя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием / под общ. ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
- Островский В.И., Савицкая В.Г. О взаимосвязи физических процессов при шлифовании // Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Изд-во ППИ, 1986. С. 3–9.
- Совкин В.Ф., Быков Е.В., Бударин А.М., Бударина Г.И. Шлифование легированных и жаропрочных сталей. Куйбышев: Куйбышевское кн. изд-во, 1967. 160 с.
- Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
- Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
- Сипайлов В.А. Влияние теплообмена на температурное поле подвижного полосового источника // Физико-математические науки: сб. науч. трудов. № 21. Пермь: ППИ, 1966. С. 3–17.
- Сипайлов В.А., Якимов А.В. Влияние охлаждения на температурное поле при плоском шлифовании // Методы изготовления зубчатых колес: материалы науч.-техн. конф. Пермь: ППИ, 1967. С. 74–87.
- Сипайлов В.А. Рахматулин Г.Г., Якимов А.В., Ханжин Н.Н. Расчет температур при резбошлифовании // Повышение надежности и долговечности машин: сб. науч. трудов. № 40. Пермь: ППИ, 1969. С. 64–74.
- Напарьин Ю.А., Паньков Л.А., Ярмонов Н.А. К расчету температур при шлифовании // Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: тезисы докладов конф. Пермь: ППИ, 1972. С. 118–121.
- Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
- Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 128 с.
- Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. 128 с.
- Jaeger J.C. Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contact // Proc. Roy. Soc. of New South Wales. 1942. Vol. 76. P. 203–224.
- Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
- Паршаков А.Н., Напарьин Ю.А., Потемкин В.И., Ярмонов Н.А. Аналитические методы исследования тепловых явлений при шлифовании. Пермь: Изд-во ПГУ, 1977. 72 с.
- Ларшин В.П., Ковальчук Е.Н., Якимов А.В. Применение решений теплофизических задач к расчету температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании // Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Изд-во ППИ, 1986. С. 9–16.
- Полетаев В.А., Волков Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.
- Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. М.: Высш. шк., 1988. 559 с.

19. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
  20. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
  21. Постнов В.В., Юрьев В.Л. Термодинамика и технология нестационарной обработки металлов резанием. М.: Машиностроение, 2009. 269 с.
  22. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 407 с.
- REFERENCES**
1. Khudobin L.V., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniem* [Lubricating-cooling processing agents and their application during cutting treatment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 544 p.
  2. Ostrovsky V.I., Savitskaya V.G. About the interrelationship of physical processes during grinding. *Mezhvuz. sbornik nauch. trudov*. Perm', PPI Publ., 1986, pp. 3–9.
  3. Sovkin V.F., Bykov E.V., Budarin A.M., Budarina G.I. *Shlifovanie legirovannykh i zharoprochnykh staley* [Grinding of high-hardness and heat-resistant steels]. Kuybyshev, Kuybyshevskoe knizhnoe izdatelstvo Publ., 1967, 160 p.
  4. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of processes of materials machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 279 p.
  5. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 288 p.
  6. Sipaylov V.A. Influence of heat transfer on the temperature field of movable bandpass source. *Sbornik nauch. trudov "Fiziko-matematicheskie nauki"*. Perm', PPI Publ., 1966, no. 21, pp. 3–17.
  7. Sipaylov V.A., Yakimov A.V. Influence of cooling-down on the temperature field during flat grinding. *Materialy nauch.-tekhn. konf. "Metody izgotovleniya zubchatykh koles"*. Perm', PPI Publ., 1967, pp. 74–87.
  8. Sipaylov V.A., Rakhmatulin G.G., Yakimov A.V., Khanzhin N.N. Calculation of temperatures during thread grinding. *Sbornik nauch. trudov "Povysheniye nadezhnosti i dolgovechnosti mashin"*. Perm', PPI Publ., 1969, no. 40, pp. 64–74.
  9. Naparyin Yu.A., Pan'kov L.A., Yarmonov N.A. On the calculation of temperatures during grinding. *Tezisy dokladov konf. "Povysheniye nadezhnosti i dolgovechnosti izdeliy mashinostroeniya"*. Perm', PPI Publ., 1972, pp. 118–121.
  10. Sipaylov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes during grinding and the product quality management]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 167 p.
  11. Evseev D.G. *Formirovaniye svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke* [Formation of surface layers properties during abrasive treatment]. Saratov, Saratovskiy universitet Publ., 1975, 128 p.
  12. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Fizicheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Basic physics of grinding process]. Saratov, Saratovskiy universitet Publ., 1978, 128 p.
  13. Jaeger J.C. Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contact. *Proc. Roy. Soc. of New South Wales*, 1942, vol. 76, pp. 203–224.
  14. Yakimov A.V. *Optimizatsiya protsessa shlifovaniya* [Grinding process optimization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 176 p.
  15. Parshakov A.N., Naparyin Yu.A., Potemkin V.I., Yarmonov N.A. *Analiticheskie metody issledovaniya teplovykh yavleniy pri shlifovanii* [Analytical methods of study of heat phenomena during grinding]. Perm', PGU Publ., 1977, 72 p.
  16. Larshin V.P., Kovalchuk E.N., Yakimov A.V. Applying of thermophysical problems solutions to the calculation of temperature and depth of defect layer during grinding. *Mezhvuz. sbornik nauch. trudov*. Perm', PPI Publ., 1986, pp. 9–16.
  17. Poletaev V.A., Volkov D.I. *Glubinnoye shlifovanie lopatok turbin* [Deep grinding of turbine blades]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 272 p.
  18. Frolov V.V., ed. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 559 p.
  19. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Teploprovodnost tverdykh tel* [Conduction of heat in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 487 p.
  20. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 599 p.
  21. Postnov V.V., Yuryev V.L. *Termodinamika i tekhnologiya nestatsionarnoy obrabotki metallov rezaniem* [Thermodynamics and technology of unsteady cutting treatment of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 269 p.
  22. Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Avtomaticheskoe upravleniye protsessami rezaniya* [Automatic control of cutting processes]. Stary Oskol, TNT Publ., 2011, 407 p.

**THE INFLUENCE OF LUBRICATING FLUID COOLANT ACTION ON GRINDING TEMPERATURE**

© 2015

*N.V. Lishchenko*, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Physics and materials sciences”  
*Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa (Ukraine)*

*V.P. Larshin*, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Mechanical engineering technology”  
*Odessa National Polytechnic University, Odessa (Ukraine)*

*Keywords:* mathematical model; grinding temperature; method of superposition; lubricoolant; forced cooling; boundary conditions.

*Abstract:* The authors obtained the one-dimensional (in the coordinate) mathematical models to determine temperature field during grinding from the surface layer depth and in the course of time. These models take into account two types of cooling: cooling caused by the lack of heating, i.e. due to thermal conductivity of the processed material, and cooling due to the impact of lubricoolant on the processed surface. In the first case, the boundary conditions of the second kind at the stage of heating and application of method of thermal fields superposition were used; in the second one, the boundary conditions of the second and the third kinds were used in the heating and cooling area, respectively. In the second case (forced cooling), it became possible to eliminate a certain contradiction, which is the characteristic of two-dimensional temperature field model when the boundary conditions of the second and the third kinds acted simultaneously in the phase of heating. Within this model, the cooling is caused not only by the lack of heating in the cooling area, but also by heat exchange between the processed (heated) surface and the cutting lubricoolant, and the lubricoolant in this temperature model has its own temperature taken into account during the cooling process. Temperature distribution throughout the surface layer depth at the end of heating phase is the initial condition for determination of temperature field on the stage of cooling at any time measured from the end of heating phase. The authors determined the influence of lubricoolants cooling action not only on the surface temperature, but also on its distribution throughout the depth of the surface layer at any time. The study confirmed that the temperature of material deep layers may exceed the temperature of upper layers during the cooling phase, i.e. the change of heat flow direction takes place that influences the nature of structural and phase transitions of the material surface layer.