

ТЕМПЕРАТУРА ШЛИФОВАНИЯ С УЧЁТОМ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ СОЖ

Лищенко Н.В., канд. техн. наук

(Одесская национальная академия пищевых технологий)

Мочуляк А.В. (ООО «Внешторг – Микрон», г. Одесса)

Ларшин В.П., докт. техн. наук

(Одесский национальный политехнический университет)

С единых позиций исследуются и сравниваются между собой две теплофизические модели процесса шлифования, отличающиеся возможностью учёта охлаждающего влияния СОЖ. Установлено влияние СОЖ на температурное поле при шлифовании

Введение и постановка задачи. Причиной появления в поверхностных слоях деталей структур вторичной закалки или отпуска при шлифовании является высокая температура в зоне контакта круга с изделием. Для управления свойствами поверхностного слоя при шлифовании необходимо иметь математическую модель процесса, позволяющую установить влияние отдельных его параметров на температурное поле в зоне обработки и за её пределами. Теплофизика технологических процессов развивается в двух направлениях: решение задач без теплообмена с окружающей средой (шлифование «всухую») и с теплообменом (обработанный участок поверхности охлаждается за счёт СОЖ). В данной статье с единых позиций рассматриваются оба направления. Особенностью первого направления является возможность использования принципа суперпозиции температурных полей от действия разных тепловых источников. В тоже время при шлифовании с охлаждением этот принцип не действует.

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

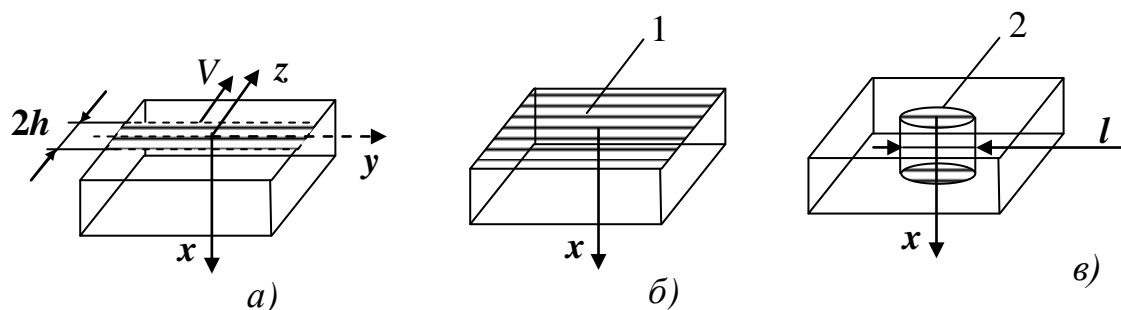


Рис.1. Схема подвижного (а) и неподвижного (б, в) теплового источника (в заштрихованной зоне имеют место ГУ второго рода): 1, 2 – плоские торцы полуграниченного в направлении оси x тела и тонкого адиабатического стержня, соответственно.

По адиабатической поверхности $x = 0$ полубесконечного тела в направлении оси z движется со скоростью V бесконечно длинный (по оси y) полосовой источник тепла шириной $2h$. Плотность теплового потока в пределах теплового источника принимают, равной постоянной величине q . Теплообмен адиабатической поверхности с окружающей средой отсутствует. Передача тепловой энергии в направлении координат x (глубинные слои) и z (в направлении движения источника) осуществляется за счёт теплопроводности и конвекции, соответственно, т.е. теплообмен с окружающей средой отсутствует. Решение тепловой задачи для данной теплофизической схемы впервые получил John Conrad Jaeger применительно к «скользящему контакту», представляющему собой «полосовой источник тепла» [1]. Применительно к шлифованию эта модель была предложена в работах Якимова А.В. [2] и Сипайлова В.А. [3]. Результатом решения этой теплофизической задачи является следующее уравнение [3], описывающее температурное поле $T(Z, X, H)$ от подвижного полосового источника

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

$$\xi = \frac{V(z - z')}{2a}; \quad X = \frac{V \cdot x}{2a}; \quad Z = \frac{V \cdot z}{2a}; \quad H = \frac{V \cdot h}{2a}.$$

где q – интенсивность (плотность) теплового потока, Вт/м²; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); V – скорость движения источника в направлении оси z (рис.1, а), м/с; K_0 – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка; H – безразмерная полуширина теплового источника; X – безразмерная координата; h – полуширина источника тепла ($0 \leq h \leq h_{\max}$), м; x – размерная координата, направленная по глубине поверхностного слоя, м.

В уравнении (1) закон движения источника тепла задан в виде $z = z' - V\tau'$, где z' – дополнительная переменная; τ' – время, определяющее координату z в квазиустановившемся температурном процессе.

Уравнение (1) не позволяет учитывать влияние принудительного охлаждения на температурное поле при шлифовании, с одной стороны, и является достаточно сложным для его использования в системах технологической диагностики, с другой стороны. Попытка учесть влияние СОЖ, предпринятая, например Сипайловым В.А. [3] и Паршаковым А.Н. [4], позволила получить только приближенное решение. Сложность задачи обусловлена необходимостью учесть одновременно граничные условия второго и третьего рода: в зоне контакта действует граничное условие второго рода, а за пределами этой зоны (куда попадает СОЖ) – граничное условие третьего рода. Как следствие, тепловая задача характеризуется разрывными (неоднородными) граничными условиями, для учета которых необходимо применять специальные математические приемы [3, 5]. Полученное при этом решение (в данной статье не приводится) имеет ряд недостатков: не оценена погрешность принятых допущений, не учитывается влияние температуры СОЖ на температуру шлифования. Так в решении, например, Сипайлова В.А. [3], охлаж-

дающее действие СОЖ учитывается только через коэффициент теплообмена (α). В аналогичном решении Паршакова А.Н. [4] температура СОЖ была принята равной нулю на этапе постановки задачи.

Целью работы является разработка единой математической модели температурного цикла шлифования, включающего этапы нагрева и охлаждения, а также исследовать влияние СОЖ на распределение температуры по глубине поверхностного слоя.

Результаты исследований. Разделив обе части уравнения (1) на множитель $\frac{2qa}{\pi\lambda V}$, получим двумерное решение в безразмерном виде

$$\Theta(Z, X, H) = \int_{Z-H}^{Z+H} \exp -\xi K_o \sqrt{X^2 + \xi^2} d\xi. \quad (2)$$

Ближайшим аналогом рассмотренной двумерной теплофизической модели является одномерная теплофизическая модель процесса (рис.1, б), в соответствии с которой тепловой поток q действует на плоской граничной поверхности полубесконечного тела в течение ограниченного времени $\tau = 2h/V$. Это время точно равно времени прохождения «теплосоздающей» полосы шириной $2h$ со скоростью V над исследуемой точкой шлифуемой поверхности. Особенностью этой задачи является возможность замены ограниченного по площади плоского полосового источника тепла (рис.1, а) плоским торцом полубесконечного твёрдого тела (рис.1, б). Причём, 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, каким угодно малым. Причём, в направлении оси x стержня направлен «линейный» тепловой поток q . Слово «линейный» означает, что вектор q теплового потока в любой точке стержня параллелен оси x . Предполагается, что площадь зоны 2 с габаритным размером l составляет меньшую часть площади зоны 1. Причём такую часть, при которой искажение «линейности» теплового потока отсутствует (линии теплового потока перпендикулярны торцу и параллельны оси x).

Уравнение, описывающее одномерное температурное поле $T(X, H)$ от неподвижного источника тепла, эквивалентное на этапе нагрева рассмотренному выше уравнению (2) для подвижного полосового источника, в обозначениях принятых для полосового источника имеет вид [5]:

$$\Theta(X, H) = 2\pi\sqrt{H} \operatorname{ierfc} \frac{X}{2\sqrt{H}}. \quad (3)$$

Анализ литературы показывает, что одномерная теплофизическая модель на основе уравнения (3) до сих пор не нашла должного применения для изучения процесса шлифования и управления им. Для того, чтобы с помощью одномерного решения (3) описать температурное поле на интервале времени охлаждения ($\tau_{\max} \leq \tau < \infty$), но при отсутствии СОЖ, применим принцип суперпозиции (сложения) двух температурных полей от действия двух тепловых источников.

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

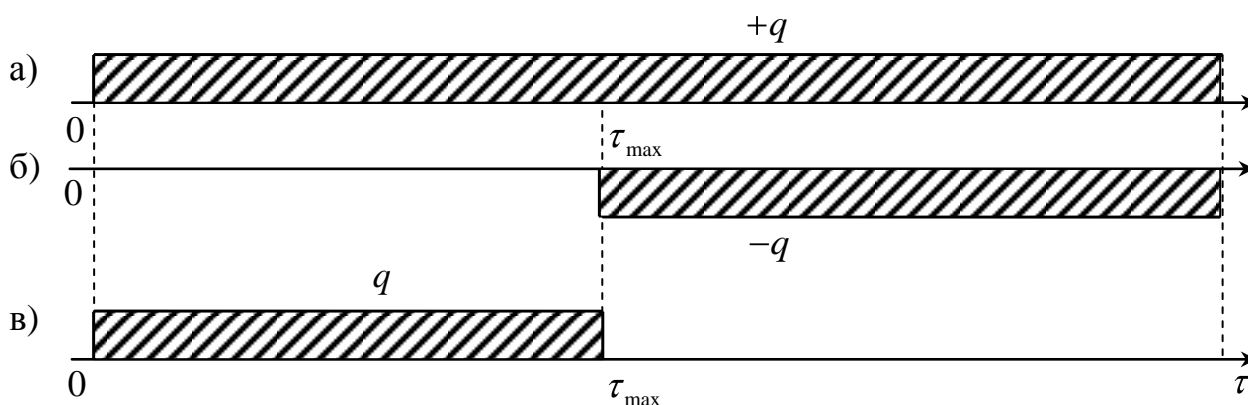


Рис.2. Представление линейного теплового потока q (в) на ограниченном интервале времени $0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$ в виде суммы тепловых потоков $+q$ (а) и $-q$ (б).

Для безразмерной температуры указанные интервалы безразмерного времени составляют, соответственно, $0 \leq H \leq H_{\max}$ и $H_{\max} \leq H < \infty$. Расчет температуры на участке действия теплового потока q производят по уравнению (3), а на участке, где тепловой поток отсутствует ($H_{\max} \leq H < \infty$), расчет производят по формуле

$$\Theta' X, H = \Theta X, H - \Theta X, H - H_{\max} . \quad (4)$$

Таким образом, одна двумерная математическая модель (2) идентична совокупности двух одномерных математических моделей (3) и (4). Отличие вызвано только количеством пространственных координат. Установлено [5], что на этапе нагрева в интервале $4 \leq H \leq 20$, двумерная модель в виде (2), с одной стороны, и одномерная модель в виде (3) и (4) – с другой, при расчете максимальных температур на поверхности и по глубине двукратного падения температуры, дают результаты, отличающиеся не более чем на 5 %.

Уравнения (1) и (2) не учитывают охлаждающего влияния СОЖ на температуру шлифования и на её распределение по глубине поверхностного слоя. В этой связи в данной статье 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 и имеет место. 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 в условиях ее теплообмена с СОЖ. Температурное поле на этапе нагрева описывается

математической зависимостью, представляющей собой решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности [5]. Эта зависимость с учётом выражения (3) и принятых ранее обозначений имеет вид

$$T_{i\dot{\lambda}\dot{A}D}(x, t_H) = 2\pi\sqrt{H}ierfc \frac{X}{2\sqrt{H}} \cdot \frac{2 \cdot q \cdot a}{\pi \cdot \lambda \cdot V} = \frac{2 \cdot q}{\lambda} \cdot ierfc \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t_H}}, \quad (5)$$

где t_f – время нагрева, $t_f = \frac{2h}{V}$, с.

Очевидно, что распределение температуры по глубине поверхностного слоя в конце этапа нагрева является начальным условием для определения температурного поля на этапе охлаждения. Анализ работы [6] позволил установить, что для определения температуры шлифования $\dot{O}_i \dot{\sigma}_E(x, t)$ на этапе охлаждения (с начальными условиями, полученными на этапе нагрева) можно использовать следующее уравнение

$$\begin{aligned} \dot{O}_i \dot{\sigma}_E(x, t) = & \int_0^{\infty} \left[\frac{1}{2\sqrt{\pi \cdot a \cdot t}} \left\{ \exp\left(-\frac{x-x'}{2\sqrt{a \cdot t}}\right) + \exp\left(-\frac{x+x'}{2\sqrt{a \cdot t}}\right) \right\} - \right. \\ & \left. - A \exp(-a \cdot t) \cdot A^2 + A \cdot x + x' \times erfc\left(\frac{\tilde{\sigma} + \tilde{\sigma}'}{2\sqrt{a \cdot t}} + A\sqrt{a \cdot t}\right) \right] \cdot f(x') dx' + \\ & + a \cdot A \int_0^t \left[\frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}\right)}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (t-\tau)}} - A \exp(-a \cdot A^2 \cdot t - \tau) + A \cdot x \times \right. \\ & \left. \times erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} + A\sqrt{a(t-\tau)}\right) \right] \varphi(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Причём

$$f(x') = \frac{2q \cdot \sqrt{a \cdot t_1}}{\lambda} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x'^2}{4a \cdot t_1}\right) - \frac{x'}{2\sqrt{a \cdot t_1}} \cdot erfc\left(\frac{x'}{2\sqrt{a \cdot t_1}}\right) \right] + \dot{O}_0,$$

где t – время охлаждения, с; $\dot{A} = \alpha / \dot{a}$ – приведенный коэффициент теплообмена; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°С); \dot{O}_0 – исходная температура материала, °С.

Совокупность уравнений (5) и (6) описывает температурное поле при шлифовании на этапах нагрева и охлаждения обрабатываемой поверхности, соответственно, причём уравнение (6) учитывает охлаждающее действие СОЖ. Единство задачи температурного цикла шлифования обеспечивается тем, что температура любой точки поверхности и поверхностного слоя в конце временного этапа нагрева равна соответствующей температуре в начале временного этапа охлаждения.

В технической литературе по шлифованию до сих пор нет исследований температурного поля по уравнению (6), которое имеет ряд важных особенностей. Это уравнение позволяет учесть не только охлаждающие свойства СОЖ, но также её температуру $\varphi(\tau)$, которая может быть постоянной и переменной во времени.

Исследование уравнения (6) проводили в среде MathCAD при следующих исходных данных, характеризующих процесс шлифования: $a = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 42 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; $q = 40 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $\alpha = 10\,000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; $\varphi \tau = 20 \text{ °C}$. Время нагрева (t_f) и охлаждения (t) на соответствующих этапах шлифования меняли в одинаковых интервалах: $0 \leq t_f \leq 0,1 \text{ с}$ и $0 \leq t \leq 0,1 \text{ с}$ (рис.3).

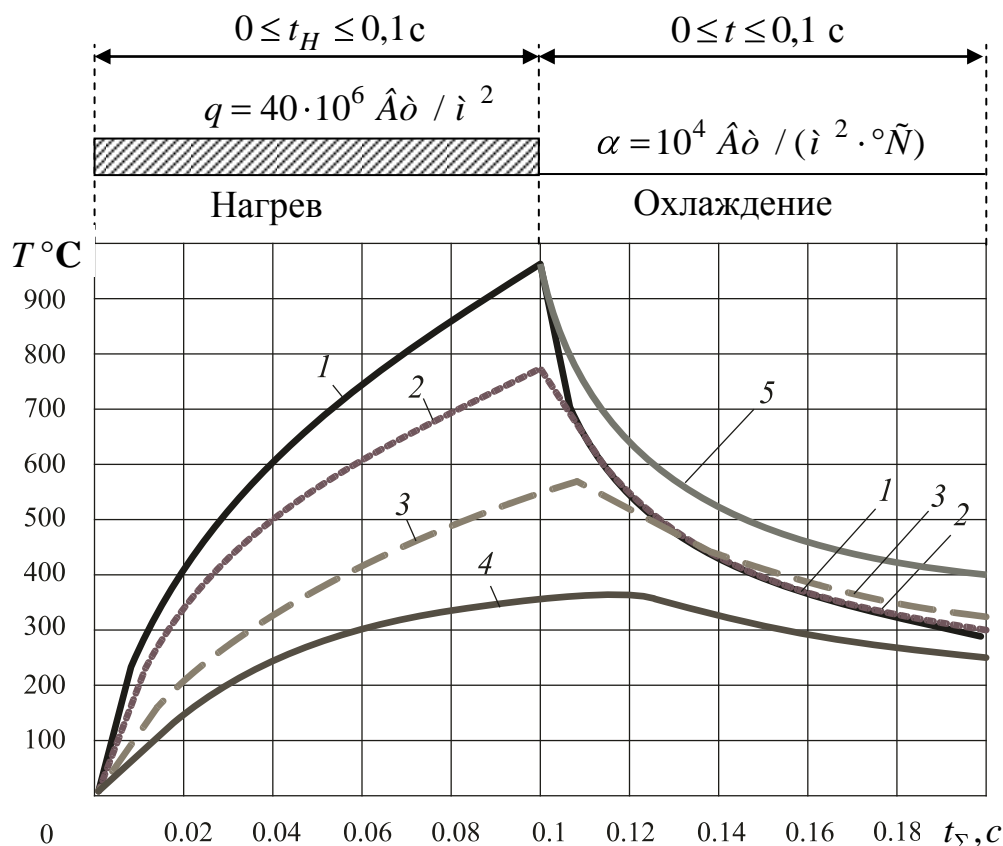


Рис.3. Изменение температуры шлифования $T, \text{°C}$ во времени ($0 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2 \text{ с}$) на этапах нагрева ($0 \leq t_{\Sigma} \leq 0,1 \text{ с}$) и охлаждения ($0,1 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2$): 1, 2, 3, 4 – $x = 0, 200, 500, 1000 \text{ мкм}$ при $\alpha = 10^4 \hat{A}\hat{\delta} / (\hat{i}^2 \cdot \text{°Ñ})$; 5 – $x = 0$ при $\alpha = 0$.

Видно, что при $x = 500 \text{ мкм}$ и при $x = 1000 \text{ мкм}$ температура шлифования продолжает увеличиваться даже на этапе охлаждения, достигает максимального значения, а затем уменьшается.

Возрастание температуры в глубинных слоях материала на этапе охлаждения (т.е. на участке $0,1 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2 \text{ с}$) в технической литературе известно. Это описано, например, в работе [7] при анализе двумерного решения Сипайлова В.А., учитывающего теплообмен. Сходство результатов расчёта по уравнению (6) и по более сложной методике Сипайлова В.А. подтверждает правомерность уравнения (6) для описания температурного поля на этапе охлаждения при наличии теплообмена.

Выводы. 1. Предложена новая методика определения температуры шлифования, в соответствии с которой температуру находят последовательно на этапе нагрева и охлаждения по уравнениям (5) и (6), соответственно.

2. Предложено уравнение (6) для определения температуры шлифования во времени и по глубине поверхностного слоя на этапе охлаждения, позволяю-

щее 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. На основе полученной математической модели исследовано влияние СОЖ на температуру шлифования и её распределение по глубине поверхностного слоя. Установлено, что на этапе охлаждения температура в глубинных слоях материала может превышать температуру вышележащих слоёв. Т.е. имеет место изменение направления теплового потока, которое оказывает влияние на характер структурно-фазовых превращений материала поверхностного слоя.

Список литературы

1. Jaeger, J.C. "Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contact", Proc. Roy. Soc. of New South Wales, Vol.76, 1942, pp. 203-224.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
4. Аналитические методы исследования тепловых явлений при шлифовании. Учебное пособие. / А.Н. Паршаков, Ю.А. Напарьин, В.И. Потемкин, Н.А. Яргонов. – Пермь: Изд. ПГУ, 1977. – 72 с.
5. Ларшин В.П. Применение решений теплофизических задач к расчету температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании // Межвузовский сборник научных трудов / В.П. Ларшин, Е.Н. Ковальчук, А.В. Якимов. – Пермь: Изд. ППИ, 1986. – С.9-16.
6. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
7. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов.: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 128 с.

Анотація

Температура шліфування з урахуванням охолоджувального впливу МОР

З єдиних позицій досліджуються і порівнюються між собою дві теплофізичні моделі процесу шліфування, що відрізняються можливістю врахування охолоджувального впливу МОР. Встановлено вплив МОР на температурне поле при шліфуванні.

Abstract

Grinding temperature taking account of the grinding fluid cooling effect

On the common base, with and without grinding fluid cooling effect two heat conduction models of grinding process are studied and compared. The influence of the grinding fluid on the temperature field has been established