

УДК 621.92.01

Н.В. Лищенко, канд. техн. наук, Одес. нац. політехн. ун-т.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ТЕМПЕРАТУРУ ШЛИФОВАНИЯ

Н.В. Лищенко. Дослідження впливу мастильно-охолоджувальної рідини на температуру шліфування. Розроблено математичну модель температурного циклу шліфування, що включає етапи нагріву і охолодження при шліфуванні із застосуванням і без застосування мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Установлено вплив МОР на температуру шліфування.

Ключові слова: шліфування, температурний цикл, теплопровідність, мастильно-охолоджуюча рідина, примусове охолодження.

Н.В. Лищенко. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на температуру шлифования. Разработана математическая модель температурного цикла шлифования, включающего этапы нагрева и охлаждения с применением и без применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Установлено влияние СОЖ на температуру шлифования.

Ключевые слова: шлифование, температурный цикл, теплопроводность, смазочно-охлаждающая жидкость, принудительное охлаждение.

N.V. Lishchenko. Investigation of metal-working coolant's influence on the grinding temperature. A mathematical model of the grinding temperature cycle including the heating and cooling stages with and without applying a metal-working coolant is developed. The effect of the coolant on grinding temperature is established.

Keywords: grinding, temperature cycle, conduction of heat, metal-working coolant, forced cooling.

При шлифовании причиной появления в поверхностных слоях деталей структур вторичной закалки или отпуска является высокая температура в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой. Для управления свойствами поверхностного слоя при шлифовании необходима математическая модель теплового 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 — обработанный участок по-

верхности охлаждается смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ). Особенностью первого является возможность использования принципа суперпозиции температурных полей от действия на обрабатываемую поверхность разных тепловых источников [1]. При шлифовании с охлаждением этот принцип не действует. С единых позиций следует рассмотреть оба направления.

Моделирование температурного поля обычно осуществляют на основе теплофизической схемы теплового процесса (рис. 1).

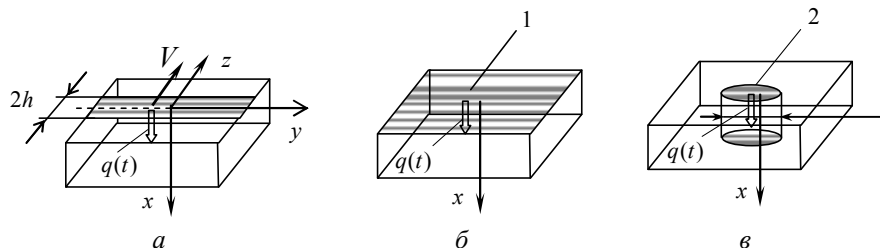


Рис. 1. Схема теплового процесса с подвижным (а) и неподвижным (б, в) источниками тепла (в заштрихованной зоне имеют место граничные условия второго рода [1]): 1, 2 — плоские торцы полуограниченного в направлении оси x тела (б) и тонкого адиабатического стержня (в), соответственно

Наиболее распространена теплофизическая схема — подвижный полосовой источник тепла (рис. 1, а). По адиабатической поверхности, т.е. при $x=0$, полуограниченного тела в направлении оси z со скоростью V движется бесконечно длинный по оси y полосовой источник тепла шириной $2h$. Плотность теплового потока в пределах теплового источника принимают равной постоянной величине $q(t) = q$. Теплообмен адиабатической поверхности с окружающей средой отсутствует. Передача тепловой энергии в направлении координаты x — в глубинные слои и z — по поверхности заготовки в направлении движения источника осуществляется за счет теплопроводности и конвекции, соответственно, т.е. теплообмен с окружающей средой в модели отсутствует. Решение тепловой задачи для данной теплофизической схемы впервые получено применительно к “скользящему контакту”, представляющему собой “полосовой источник тепла” [2]. Применительно к шлифованию эта модель была усовершенствована [3, 4]. Результатом решения этой теплофизической задачи является уравнение, описывающее температурное поле от подвижного полосового источника по глубине поверхностного слоя [4]

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

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

где q — плотность теплового потока, Вт/м²;

a — температуропроводность обрабатываемого материала, м²/с;

λ — теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·°С);

V — скорость движения источника тепла в направлении оси z , 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;

τ' — время, определяющее координату z в квазиустановившемся температурном процессе, с.

Уравнение (1) не учитывает влияние принудительного охлаждения на температурное поле при шлифовании и весьма сложное для использования в системах технологической диагностики. Учет принудительного охлаждения на основе уравнения (1) позволило получить только приближенное решение [4]. Сложность задачи обусловлена необходимостью одновременно учета граничных условий второго и третьего рода — условий теплообмена на поверхности тела. В зоне контакта действуют граничные условия второго рода — задается тепловой поток, а за пределами этой зоны, куда попадает СОЖ, — третьего рода (задаются условия конвективного теплообмена). Как следствие, тепловая задача характеризуется разрывными (неоднородными) граничными условиями, для учета которых необходимо применять специальные математические приемы. Полученное на основе уравнения (1) решение [4] имеет ряд недостатков: не оценена погрешность принятых допущений и не учитывается влияние температуры СОЖ на температуру шлифования. Так, охлаждающее действие СОЖ учитывается только через коэффициент теплообмена α , температура СОЖ принята равной нулю на этапе постановки задачи [4].

Предлагается методика определения температуры шлифования на поверхности и по глубине поверхностного слоя. Температурный цикл шлифования разбивается на два последовательных во времени этапа, как это происходит в действительности. На первом этапе обрабатываемая поверхность нагревается 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 теплообмена с СОЖ. Для реализации подхода разработана единая математическая модель температурного цикла шлифования, включающего этапы нагрева и охлаждения поверхности, а также исследовано по этой модели влияние принудительного охлаждения заготовки на распределение температуры по глубине поверхностного слоя.

Ближайшим аналогом двумерной теплофизической модели, на основе которой получено уравнение (1), предложено считать одномерную теплофизическую модель процесса (рис. 1, б). В этой модели постоянный по величине тепловой поток $q(t)$ действует на точку плоской граничной поверхности полубесконечного тела в направлении оси x в течение ограниченного времени нагрева $0 \leq t \leq t_f$. Это время $t_f = \frac{2h}{V}$ равно времени прохождения “теплосоздающей” полосы шириной $2h$ со скоростью V над исследуемой точкой шлифуемой поверхности [5], 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 модели является возможность замены ограниченного по ширине плоского полосового источника тепла (см. рисунок 1, а) плоским торцом полубесконечного твердого тела (см. рисунок 1, б), на который столько же времени ($0 \leq t \leq t_f$) действует неподвижный источник тепла. Площадь плоского торца может быть либо безгранична (заштрихованная зона 1 на рис.1, б), либо ограничена площадью плоского торца вертикального стержня (заштрихованная зона 2 на рис.1, в), габаритный размер l которого при любой конфигурации торца может быть каким угодно малым. По оси x стержня направлен “линейный” тепловой поток $q(t)$ в интервале времени $0 \leq t \leq t_f$, т.е. вектор $q(t)$ в любой точке торца стержня параллелен оси x . Предполагается, что площадь зоны 2 с габаритным размером l составляет меньшую часть площади зоны 1, при которой искажение “линейности” теплового потока по глубине поверхностного слоя отсутствует (линии теплового потока перпендикулярны торцу стержня и параллельны оси x).

Уравнение, описывающее одномерное температурное поле $T(x, t)$ на интервале времени нагрева $0 \leq t \leq t_f$, имеет вид [6]

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

где $0 \leq t \leq t_j$ — время действия неподвижного источника тепла (время нагрева обрабатываемой поверхности), с;

$\operatorname{ierfc}(u)$ — обозначение специальной функции [4];

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

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

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). Для этого вместо реального источника тепла, действующего на интервале времени нагрева (рис. 2, а), вводят два расчетных источника.

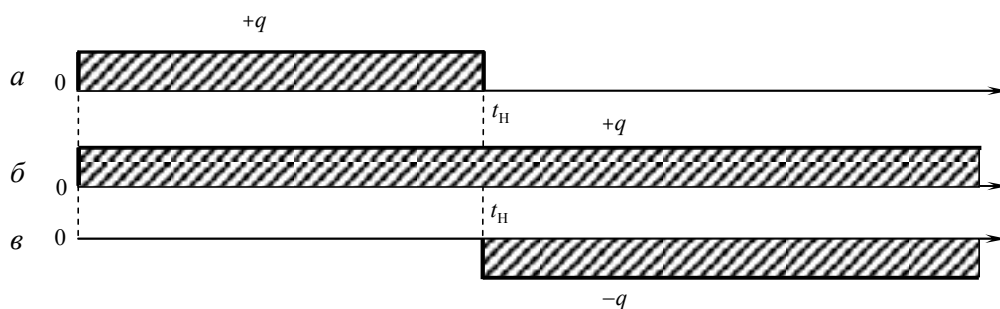


Рис.2. Замена реального источника тепла с плотностью теплового потока $+q$ на интервале времени $0 \leq t \leq t_H$ (а) на два расчетных источника тепла с плотностями теплового потока $+q$ и $-q$ на интервалах $0 \leq t \leq \infty$ (б) и $t_H \leq t \leq \infty$ (в), соответственно

Первый источник с положительной плотностью теплового потока $+q$ действует в интервале времени $0 \leq t \leq \infty$, а второй с отрицательной плотностью теплового потока $-q$ действует в интервале времени $t_H \leq t < \infty$ (рисунок 2, б, в, соответственно). Расчет температуры от действия двух указанных источников тепла на интервале $t_H \leq t < \infty$ производят по формуле

$$T'(x, t) = T(x, t) - T(x, t_H). \quad (4)$$

Таким образом, одна двумерная математическая модель (1) идентична совокупности двух одномерных математических моделей (3) и (4). Отличие вызвано только количеством пространственных координат. Установлено [5], 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 двукратным падением температуры, двумерная модель (1) и одномерная модель (3), (4) дают результаты, отличающиеся не более, чем на 5 %, однако обе эти модели не учитывают охлаждающего влияния СОЖ на температуру шлифования и на ее распределение по глубине поверхностного слоя.

Очевидно, что распределение температуры по глубине поверхностного слоя в конце этапа нагрева является начальным условием для определения температурного поля $T_{\text{ОХЛ}}(x, t)$ на этапе

охлаждения. Для определения $T_{\text{охл}}(x, t)$ с начальными условиями, полученными на этапе нагрева, можно использовать уравнение [6]

$$\begin{aligned}
 T_{\text{охл}}(x, t) = & \int_0^{\infty} \left[\frac{1}{2\sqrt{\pi at}} \left\{ \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) + \exp\left(-\frac{(x+x')^2}{4at}\right) \right\} - \right. \\
 & \left. - A \exp(atA^2 + A(x+x')) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x+x'}{2\sqrt{at}} + A\sqrt{at}\right) \right] f(x') dx' + \\
 & + aA \int_0^t \left[\frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}\right)}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} - A \exp(aA^2(t-\tau) + Ax) \times \right. \\
 & \left. \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} + A\sqrt{a(t-\tau)}\right) \right] \varphi(\tau) d\tau; \\
 f(x') = & \frac{2q\sqrt{at_H}}{\lambda} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x'^2}{4at_H}\right) - \frac{x'}{2\sqrt{at_H}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x'}{2\sqrt{at_H}}\right) \right] + T_0,
 \end{aligned} \tag{5}$$

где $0 \leq t < \infty$ — время охлаждения, с;

$A = \frac{\alpha}{a}$ — приведенный коэффициент теплообмена, Дж/(м⁴·°С);

α — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°С);

T_0 — температура обрабатываемого материала до шлифования, °С;

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

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 обеспечивается тем, что температура любой точки поверхности и поверхностного слоя в конце временного этапа нагрева является температурой в начале временного этапа охлаждения.

До сих пор не исследовано температурное поле по уравнению (5), которое имеет ряд важных особенностей в условиях принудительного охлаждения. Это уравнение позволяет учесть не только охлаждающие свойства СОЖ, но также ее температуру $\varphi(\tau)$, которая может быть постоянной и переменной во времени.

Исследование уравнения (5) проводили в среде MathCAD при следующих исходных данных, характеризующих процесс шлифования: $a = 8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 42$ Вт/(м·°С); $q = 40 \cdot 10^6$ Вт/м²; $\alpha = 10\,000$ Вт/(м²·°С); $\varphi(\tau) = 20^\circ\text{С}$. Время нагрева t_1 и охлаждения t в уравнениях (3) и (5) на соответствующих этапах шлифования меняли в одинаковых интервалах: $0 \leq t_1 \leq 0,1$ и $0 \leq t \leq 0,1$ с. Применительно к единому времени цикла шлифования $t_{\Sigma} = t_{\Sigma_1} + t_{\Sigma_2}$ эти интервалы составляют: $0 \leq t_{\Sigma_1} \leq 0,1$ и $0,1 \leq t_{\Sigma_2} \leq 0,2$ с, соответственно (рис. 3).

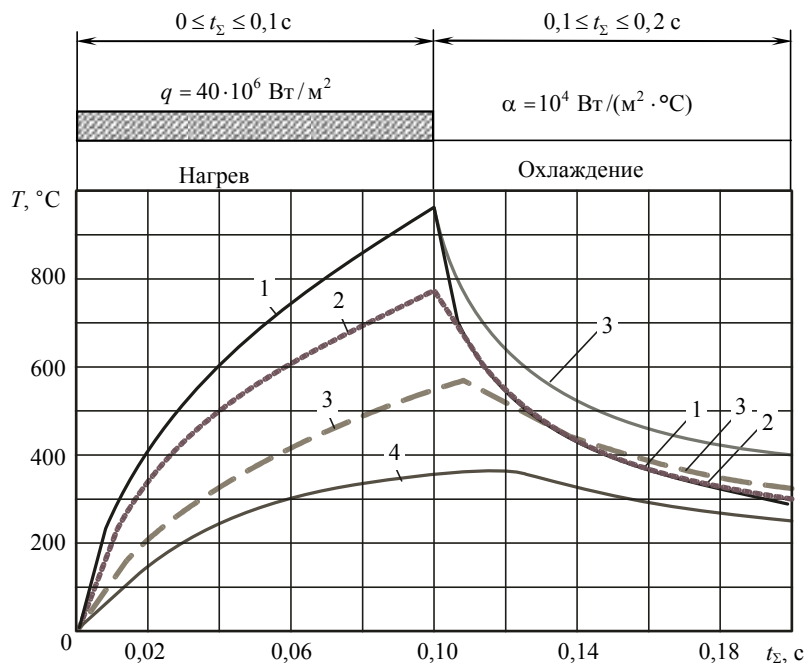


Рис.3. Изменение температуры шлифования $T^{\circ}\text{C}$ во времени ($0 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2 \text{ c}$) на этапах нагрева ($0 \leq t_{\Sigma} \leq 0,1 \text{ c}$) и охлаждения ($0,1 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2$): 1, 2, 3, 4 — $x = 0, 200, 500, 1000 \text{ мкм}$ при $\alpha = 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2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

Видно, что при $x = 500$ и 1000 мкм $T^{\circ}\text{C}$ продолжает увеличиваться до максимального значения 560 и 370°C даже на этапе охлаждения, а затем уменьшается.

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

Выводы:

- предложена методика определения температуры шлифования, в соответствии с которой температуру находят последовательно на этапах нагрева и охлаждения по уравнениям (3) и (4) при охлаждении за счет теплопроводности обрабатываемого материала и по уравнениям (3) и (5) — при принудительном охлаждении;

- использованное уравнение (5) для определения температуры шлифования во времени и по глубине поверхностного слоя на этапе принудительного охлаждения за счет СОЖ позволяет установить влияние постоянной и переменной температуры СОЖ на температурное поле при шлифовании;

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

- исследовано влияние СОЖ на температуру шлифования и ее распределение по глубине поверхностного слоя;

- подтверждено, что на этапе охлаждения температура в глубинных слоях материала может превышать температуру вышележащих слоев, т.е. имеет место изменение направления теп-

лового потока, которое оказывает влияние на характер структурно-фазовых превращений материала поверхностного слоя.

Литература

1. Евсеев, Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. — Саратов.: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. — 128 с.
2. Jaeger, J.C. Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contact / J.C. Jaeger // Proc. Roy. Soc. of New South Wales. — 1942. Vol.76. — P. 203 — 224.
3. Якимов, А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. — М.: Машиностроение, 1975. — 176 с.
4. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. — М.: Машиностроение, 1978. — 167 с.
5. Ларшин, В.П. Применение решений теплофизических задач к расчету температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании / В.П. Ларшин, Е.Н. Ковальчук, А.В. Якимов // Межвуз. сб. науч. тр.— Пермь: Изд-во ППИ, 1986. — С. 9—16.
6. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. — М.: Наука, 1964. — 487 с.

References

1. Evseev, D.G. Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke [Forming of surface layer properties in abrasive machining] / D.G. Evseev. — Saratov, 1975. — 128 p.
2. Jaeger, J.C. Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contact / J.C. Jaeger // Proc. Roy. Soc. of New South Wales. — 1942. Vol. 76. — PP. 203 — 224.
3. Yakimov, A.V. Optimizatsiya protsesssa shlifovaniya [Grinding process optimization] / A.V. Yakimov. — Moscow, 1975. — 176 p.
4. Sipaylov, V.A. Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti [Thermal processes in grinding and surface quality control] / V.A. Sipaylov. — Moscow, 1978. — 167 p.
5. Larshin, V.P. Primenenie resheniy teplofizicheskikh zadach k raschetu temperatury i glubiny defektnogo sloya pri shlifovanii [Application of thermalphysic tasks solutions to calculating temperature and defective layer depth in grinding] // Mezhvuz. sb. nach. tr. [Interuniversity collected papers] / V.P. Larshin, E.N. Koval'chuk, A.V. Yakimov. — Perm', 1986. — PP. 9—16.
6. Karslou, G. Teploprovodnost' tverdykh tel [Heat conduction in solids] / G. Karslou, D. Eger. — Moscow, 1964. — 487 p.

Рецензент д-р. техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Усов А.В.

Поступила в редакцию 1 августа 2011 г.