

УДК 621.92.01

**Н.В. Лищенко**, канд. техн. наук, доц.,  
**В.П. Ларшин**, д-р техн. наук, проф.,  
**А.В. Якимов**, д-р техн. наук, проф.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

*Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, О.В. Якимов.* **Визначення температури переривчастого шліфування.** Розроблено і досліджено математичну модель температурного макроциклу переривчастого шліфування, що включає мікроцикли нагріву і охолодження, які відповідають часу проходження різального виступу і западини переривчастого круга. Отримано залежності для визначення постійної часу і тривалості перехідного процесу зміни температури переривчастого шліфування.

*Ключові слова:* шліфування, температурні мікро- і макроцикли, шпаруватість різальних виступів шліфувального круга, постійна часу, значення температури шліфування, що встановилося.

*Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.В. Якимов.* **Определение температуры прерывистого шлифования.** Разработана и исследована математическая модель температурного макроцикла прерывистого шлифования, включающего микроциклы нагрева и охлаждения, соответствующие времени прохождения режущего выступа и впадины прерывистого круга. Получены зависимости для определения постоянной времени и длительности переходного процесса изменения температуры прерывистого шлифования.

*Ключевые слова:* шлифование, температурные микро- и макроциклы, скважность режущих выступов шлифовального круга, постоянная времени, установившееся значение температуры шлифования.

*N.V. Lishchenko, V.P. Larshin, A.V. Yakimov.* **Evaluation of discontinued grinding temperature.** A mathematical model of the discontinued grinding thermal macrocycle including the microcycles of heating and cooling, corresponding to the time of discontinued wheel cutting ledge and cavity flight is worked out and investigated. Relationships are got to determine the time constant and transient duration of discontinued grinding temperature change.

*Keywords:* grinding, thermal macro-and-microcycles, off-duty factor of cutting ledges of discontinued wheel, time constant, steady grinding temperature.

При шлифовании (например, плоском) зона контакта круга с заготовкой представляет собой прямоугольную полоску шириной  $2h$ , которая перемещается относительно заготовки со скоростью детали  $V$ . Радиус кривизны этой полоски равен половине диаметра шлифовального круга, что намного превышает величину  $2h$ . Поэтому кривизной полоски контакта в расчетах пренебрегают, считая ее плоской поверхностью. Выделяющаяся в зоне контакта тепловая энергия приводит к возрастанию температуры обрабатываемой поверхности в каждой ее точке по мере перемещения шлифовального круга в направлении вектора скорости детали. Время  $\tau$ , в течение которого каждая точка обрабатываемой поверхности находится в зоне действия "теплосоздающей" подвижной полоски, назовем временем действия теплового источника, которое изменяется в интервале  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ . Это время, например, для схемы плоского шлифования, определяют по формуле

$$\tau_H = \frac{2h}{V} = \frac{\sqrt{D} \cdot t}{V}. \quad (1)$$

В теплофизических расчетах принимают во внимание либо две пространственные координаты  $x, z$ , либо одну координату  $x$  теплофизической схемы. И первый случай (две координаты

ты  $x, z$ ) и подвижный со скоростью  $V$  полосовой источник тепла без охлаждения и при наличии принудительного охлаждения, и второй случай (одна координата  $x$ ) с учетом и без учета принудительного охлаждения рассмотрены ранее [1, 2]. При одномерной теплофизической схеме тепловое поле создается неподвижным плоским тепловым источником, действующим на поверхности полубесконечного тела в течение времени  $\tau_n$ , которое определяют по формуле (1). Различие в указанных теплофизических схемах незначительно (до 10 %) отражается на результатах расчета температуры шлифования при прочих одинаковых условиях, как при наличии принудительного охлаждения, так и без него. Поэтому целесообразно при технологическом проектировании и технологической диагностике процесса шлифования пользоваться одномерной теплофизической схемой с линейным тепловым потоком. В соответствии с этой схемой тепловое поле создается вследствие движения по координате  $x$  теплового потока, векторы плотности которого являются параллельными.

Температуру в зоне шлифования можно регулировать, если шлифование производить с определенными многократными на временном интервале  $0 \leq \tau \leq \tau_n$  перерывами. Это позволяет изменить характер температурного поля и его величину в зоне шлифования. Такой процесс можно осуществить при шлифовании специальными кругами, имеющими на рабочей поверхности ряд чередующихся выступов и впадин определенной протяженности, которые попарно образуют микроциклы нагрева (выступ) и охлаждения (впадина). Например, если скорость шлифовального круга  $V_{кр}$ , длина его режущего выступа  $l_1$ , впадины —  $l_2$ , то период времени нагрева зоны контакта  $T_1 = \frac{l_1}{V_{кр}}$  каждый раз чередуется с соответствующим периодом времени

охлаждения  $T - T_1 = \frac{l_2}{V_{кр}}$ . Следует отметить, что указанное охлаждение вызвано исключительно

отсутствием нагрева, хотя на интервалах времени охлаждения ( $T - T_1$ ) в зоне контакта может быть СОЖ, которая производит дополнительное охлаждение зоны контакта. В этом случае, будет иметь место дополнительное понижение результирующей температуры.

Таким образом, во время работы режущего выступа (нагрев) в зоне контакта действует тепловой поток  $q(\tau) = q_{max}$ , а во время отсутствия резания (охлаждение) тепловой поток отсутствует, т.е.  $q(\tau) = 0$  (рис. 1).



Рис. 1. Пульсирующий тепловой поток с плотностью  $q(\tau)$ :  $0T_1$  и  $T_1$  — интервалы времени нагрева и охлаждения (отсутствия нагрева), образующие микроциклы прерывистого шлифования с периодом микроцикла  $T$

Непрерывная последовательность микроциклов располагается на участке одного макроцикла нагрева, длительность которого как для сплошного, так и для прерывистого круга опре-

деляется временем действия теплового источника при шлифовании  $\tau_H$ , которое можно определить по формуле (1).

Известно решение для определения установившейся температуры, когда поверхность нагревается импульсным тепловым потоком с периодом  $T$  (см. рисунок 1), содержащим временные участки нагрева  $0T_1$  и охлаждения  $T_1T$  [3].

В этом решении установившаяся суммарная температура  $\Theta_{SUM}$  от воздействия на поверхность полуограниченного тела импульсного теплового потока состоит из двух составляющих, т.е.

$$\Theta_{SUM} = \Theta_R(q_{ave}) + \Theta_P(q_{max}). \quad (2)$$

Первая составляющая  $\Theta_R(q_{ave})$  непрерывно возрастает по величине и зависит от среднего уровня плотности теплового потока. Вторая составляющая  $\Theta_P = \Theta_P(q_{max})$  — импульсная периодическая, зависящая от максимального уровня плотности теплового потока. При этом

$$\Theta_R = \frac{2q_{ave}}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}} = \frac{2q_{max}}{\lambda} \frac{T_1}{T} \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}}, \quad (3)$$

где  $\tau$  — время действия теплового источника в интервале  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ , с.

$q_{ave} = q_{max} \frac{T_1}{T}$  и  $q_{max}$  — средняя и максимальная за период импульса плотность теплового потока, соответственно, Вт/м<sup>2</sup>.

$\lambda$  — теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·°C);

$a$  — температуропроводность обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;

Периодическая часть установившейся температуры определяется в соответствии с (2) на интервале одного микроцикла шлифования как [3]:

— в интервале  $0 < p < s$  (нагрев)

$$\Theta_P = \frac{2q_{max}}{\lambda} \sqrt{\frac{aT}{\pi}} \left[ (1-s)\sqrt{p} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} I(s,p) \right], \quad (4)$$

— в интервале  $s < p < 1$  (охлаждение)

$$\Theta_P = \frac{2q_{max}}{\lambda} \sqrt{\frac{aT}{\pi}} \left[ (1-s)\sqrt{p} - \sqrt{(p-s)} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} I(s,p) \right], \quad (5)$$

где  $s = \frac{T_1}{T}$  — коэффициент заполнения или величина, обратная скважности прямоугольного импульса теплового потока;

$p = \frac{\tau}{T}$  — безразмерное (относительное) время в интервале микроцикла шлифования  $0 \leq \tau \leq T$ ;

$$I(s,p) = \int_0^{\infty} \frac{[(1-s)\exp(-\xi^2) - \exp\{-(1-s)\xi^2\} + s] \exp(-p\xi^2)}{\xi^2 [1 - \exp(-\xi^2)]} d\xi. \quad (6)$$

Математическая модель (2)...(5) для определения температуры от пульсирующего теплового потока позволяет определять эту температуру в любой момент времени на интервале времени установившихся значений температур. Недостатком модели является неопределенность этого временного интервала, который наступает после окончания переходного процесса установления температуры, что ограничивает применение модели для проектирования оптимальных конструкций прерывистых шлифовальных кругов.

Предлагается следующий подход к определению температурного поля при прерывистом воздействии теплового потока. Длительность воздействия источника тепла составляет  $0 \leq \tau \leq \tau_H$  и характеризует макроцикл шлифования (см. рисунок 1). Применительно к прерывистому кругу такой способ представления одиночного импульса сохраняется, только вместо времени макроцикла  $\tau_H$  используется время микроцикла  $T_1$ . Такая попытка была сделана, однако, величина плотности теплового потока в полученной зависимости является переменной [4]. Это некорректно в связи с нарушением принципиального требования  $q_{\max} = \text{const}$ , при котором получено решение дифференциального уравнения для определения температуры шлифования.

Для прерывистого круга общее количество импульсов  $n$  (число микроциклов прерывистого шлифования) на интервале времени нагрева  $0 \leq \tau \leq \tau_H$  можно определить по формуле [4]

$$n = \frac{\sqrt{D \cdot t} \cdot V_{\text{кр}}}{V(l_1 + l_2)}. \quad (7)$$

Применяя принцип суперпозиции для любого числа  $n$ , получена рекуррентная формула для определения температуры на участке нагрева  $0 \leq \tau \leq \tau_H$

$$T = \frac{2q}{\lambda} \left( \sum_{i=1}^n \sqrt{a[\tau - (i-1)T]} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a[\tau - (i-1)T]}} - \sqrt{a[\tau - (i-1)T - T_1]} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a[\tau - (i-1)T - T_1]}} \right). \quad (8)$$

Для построения графика зависимости температуры шлифования от времени (рис. 2) по уравнениям (2)...(5) и (8) в среде MathCAD принимаем следующие исходные данные:  $D = 390$  мм (из возможного интервала 300...400 мм),  $l_1 = 20$  мм,  $l_2 = 15$  мм,  $N = 35$ ,  $V_{\text{кр}} = 35$  м/с,  $V = 2$  м/мин,  $t = 0,028$  мм,  $q_{\max} = 40 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\lambda = 42$  Вт/(м·°С),  $a = 8 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/с,  $\tau_H = 100$  мс. Кроме того,  $T = 1$  мс,  $T_1 = \frac{l_1}{V_{\text{кр}}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{35} = 0,5714$  мс,  $s = \frac{T_1}{T} = \frac{0,5714}{1} = 0,5714$ .

Видно, что температура прерывистого шлифования (кривая 2) может быть представлена суммой двух компонент: непрерывно возрастающей и периодической. Кроме того, видно, что математическая модель (2)...(5) дает наибольшую погрешность на интервале первого микроцикла шлифования. Найденному эмпирическим способом времени переходного процесса соответствует постоянная времени, которую можно найти из следующего условия. Максимальное значение амплитуды первого импульса температуры, полученного методом суперпозиции (прямая AB), равно непрерывно возрастающей компоненте температуры (точка пересечения прямой AB с кривой 4). Линия CD, проходящая через указанную точку пересечения, отсекает на абсциссе координату времени, равную постоянной времени.

Это можно представить как

$$\frac{2q_{\max}}{\lambda} \sqrt{\frac{aT_1}{\pi}} = \frac{2q_{\text{ave}}}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau_t}{\pi}}, \quad (9)$$

где  $\tau_t$  — постоянная времени переходного процесса изменения температуры.

Учитывая соотношение между параметрами  $q_{\max}$  и  $q_{\text{ave}}$ , из (9) получаем

$$\tau_t = \frac{T}{s} = TQ, \quad (10)$$

где  $Q$  — скважность прямоугольного импульса теплового потока.

Для рассматриваемого случая:  $s = 0,5714$ ;  $Q = 1,75$ ;  $T = 1$  мс и  $\tau_i = 1,75$  мс.

Известно, что время экспоненциального переходного процесса, при котором выходная величина принимает 95 % от своего установившегося значения, равно утроенному значению постоянной времени изменения выходной величины (температуры). Исходя из этого правила, время переходного процесса составит  $1,75 \cdot 3 = 5,25$  мс.

Для изучения влияния переходного процесса на форму и положение в системе координат температурного импульса периодической компоненты суммарной температуры выполнены расчеты первого  $\Theta_{p1}$  и последнего  $\Theta_p$  импульсов температуры при указанных условиях (рис. 3).

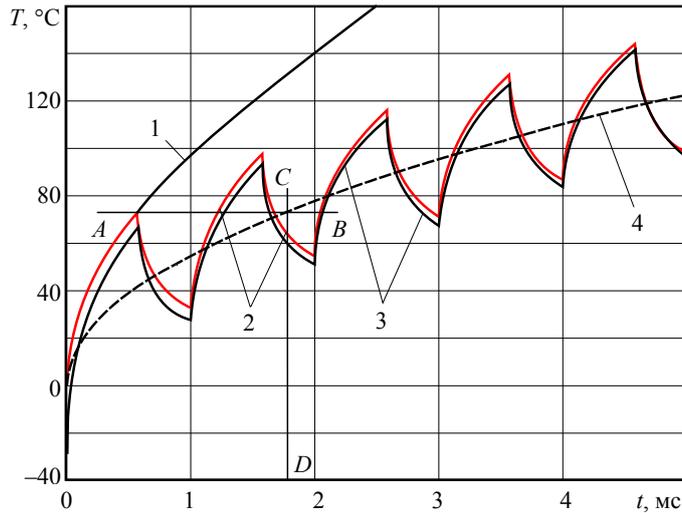


Рис. 2. Зависимость температуры шлифования от времени нагрева в начале макроцикла нагрева:

- 1 — от воздействия постоянной плотности теплового потока  $q(\tau) = q_{\max} = 40 \text{ Вт/мм}^2$ ; 2 — полученная методом суперпозиции по уравнению (8); 3 — суммарная установившаяся температура по модели (2)...(5); 4 — непрерывно возрастающая часть установившейся температуры по уравнению (3)

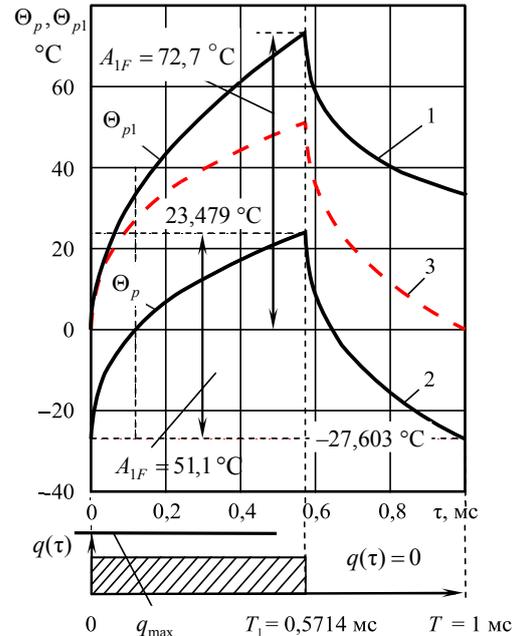


Рис. 3. Форма и положение в системе координат температурных импульсов прерывистого шлифования при  $s = 0,5714$ : 1, 2 — первый и последний импульсы температуры на интервале макроцикла нагрева  $0 \leq \tau \leq \tau_H$  во время и после окончания переходного процесса, соответственно; 3 — смещенный по вертикали импульс 2

Расчеты выполнены по формуле (8) при  $i = 1$  для первого импульса  $\Theta_{p1}$  с амплитудой  $A_{1F}$  и по формулам (4) и (5) — для последнего импульса  $\Theta_p$  с амплитудой  $A_{1L}$ .

Из анализа данных видно, что по мере выхода температуры прерывистого шлифования на установившееся значение импульс температуры его периодической компоненты уменьшается по амплитуде с 72,7 до 51,1 °С и принимает более пологую форму: по сравнению с импульсом 1 импульс 2 стремится выйти на свое установившееся значение. Кроме того, импульс 2 содержит верхнюю положительную часть с максимальным значением +23,479 °С, расположенную выше нулевого уровня температуры, и нижнюю отрицательную часть со значением -27,603 °С, расположенную ниже этого уровня (см. рисунок 3). Аналогичные расчеты при  $s = 0,5$  показали, что высота верхней положительной части установившегося импульса становится равной высоте его нижней отрицательной части, а при  $s < 0,5$  верхняя положительная часть импульса становится больше по модулю его нижней отрицательной части.

**Выводы:**

— на основе принципа суперпозиции разработана математическая модель (8) для определения температуры прерывистого шлифования, позволяющая определить температуру шлифования на переходном и установившемся участках времени макроцикла шлифования на всем интервале этого времени  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ ;

— показано, что на участке установившейся температуры прерывистого шлифования результаты расчета по разработанной математической модели (8) совпадают с результатами расчета температуры по известной модели (2)...(5), что подтверждает правомерность использования модели (8) для всего интервала времени нагрева  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ ;

— установлена постоянная времени и время переходного процесса изменения температуры, равные соответственно 1,75 и 5,25 мс для рассматриваемого случая;

— разработанная математическая модель (8) для определения температуры прерывистого шлифования позволяет выполнить оптимизацию геометрических параметров прерывистых шлифовальных кругов по критерию наименьшей температуры прерывистого шлифования при одной и той же работе, необходимой для удаления одинакового припуска разными кругами;

— выявлены параметры для оптимизации конструкций прерывистых шлифовальных кругов: число режущих выступов на круге  $N$ , коэффициент заполнения окружного шага выступов

$s = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$  (величина обратная скважности  $Q$  прямоугольных импульсов теплового потока).

**Литература**

1. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. — М.: Машиностроение, 1978. — 167 с.
2. Лищенко, Н.В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на температуру шлифования / Н.В. Лищенко // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — Одеса, 2011. — Вип. 2(36). — С. 80 — 86.
3. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. — М.: Наука, 1964. — 487 с.
4. Технология машиностроения: Учеб. /А.В. Якимов, В.Н. Царюк, А.А. Якимов и др. — Одесса: Астропринт, 2001. — 608 с.

**References**

1. Sipaylov, V.A. Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhosti [Thermal processes in grinding and surface quality control] / V.A. Sipaylov. — Moscow, 1978. — 167 pp.
2. Lishchenko, N.V. Issledovanie vliyaniya smazochno-okhlazhdayushchey zhidkosti na temperaturu shlifovaniya [Investigation of metal-cutting coolant's influence on the grinding temperature] / N.V. Lishchenko //Pr. Odes. politekhn. un-tu. [Transactions of the Odessa Polytech. Univ.]. — Odessa, 2011. — Issue 2(36). — pp. 80 — 86.
3. Karslow, G. Teploprovodnost' tverdykh tel [Heat conduction in solids] / G. Karslow, D. Yaeger. — Moscow, 1964. — 487 pp.
4. Tekhnologiya mashinostroeniya: Uchebnik [Machine manufacturing technology: Textbook] / A.V. Yakimov, V.N. Tsaryuk, A.A. Yakimov and others. — Odessa, 2001. — 608 pp.

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

Поступила в редакцию 28 августа 2012 г.