

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПРЕРЫВИСТЫМИ И ВЫСОКОПОРИСТЫМИ КРУГАМИ

*Разработана и исследована математическая модель температурного цикла прерывистого и высокопористого шлифования, включающая температурные микроциклы шлифования от воздействия режущих выступов и отдельных зерен шлифовального круга, соответственно. Сформулированы условия обеспечения преемственности математической модели для прерывистых и высокопористых шлифовальных кругов.*

**Постановка проблемы.** При шлифовании (например, плоском) зона контакта круга с заготовкой представляет собой прямоугольную полосу шириной  $2h$  (мм), которая перемещается относительно заготовки со скоростью детали  $V_d$  (м/мин). Радиус кривизны этой полосы равен половине диаметра шлифовального круга, что намного превышает величину  $2h$ . Поэтому кривизной полосы контакта в расчетах температуры шлифования пренебрегают. Выделяющаяся в зоне контакта тепловая энергия приводит к возрастанию температуры обрабатываемой поверхности в каждой её 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 полосы, назовём временем действия теплового источника, которое изменяется в интервале  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ . Это время, например, для схемы плоского шлифования, определяют по формуле

$$\tau_i = \frac{2h}{V_a} = \frac{\sqrt{Dt}}{V_a}, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр шлифовального круга, мм;  $t$  – глубина резания при шлифовании, мм.

В теплофизических расчетах принимают во внимание либо две пространственные координаты  $(x, z)$ , либо одну  $(x)$  координату теплофизической схемы. Первый случай (две координаты  $x, z$ ) и подвижный со скоростью  $V$  полосовой источник тепла без охлаждения и при наличии принудительного охлаждения рассмотрен в ряде работ, например, в работе [1]. Второй случай (одна координата  $x$ ) с учетом и без учета принудительного охлаждения рассмотрен в наших работах, например, в работе [2]. При одно- (одна координата  $x$ ) и двумерной (две координаты  $x, z$ ) теплофизическим схемам тепловое поле в рассматриваемой точке обрабатываемой поверхности создается, соответственно, неподвижным плоским тепловым источником, действующим на поверхности полубесконечного тела в течение времени  $\tau_H$  и подвижным плоским тепловым источником шириной  $2h$ , который перемещается относительно этой точки в направлении координаты  $z$  в подвижной системе координат, связанной с подвижным источником тепла. Показано [2], что различие в результатах определения температуры шлифования по одно- и двумерной теплофизическим схемам незначительно (до 10 %) 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 [2].

Температуру в зоне шлифования можно регулировать, если шлифование производить с определенными многократными на временном интервале  $0 \leq \tau \leq \tau_H$  прерывами во времени. Это позволяет изменить характер температурного поля и максимальную величину температуры в зоне контакта, когда прерывистый периодический нагрев обрабатываемой

поверхности чередуется с его отсутствием. 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 длина режущего выступа шлифовального круга  $l_1$ , а впадины  $l_2$ , то период времени нагрева зоны контакта  $T_1 = \frac{l_1}{V_{кр}}$ , где  $V_{кр}$  – линейная скорость вращения ПШК, каждый раз чередуется с соответствующим периодом времени охлаждения  $T - T_1 = \frac{l_2}{V_{кр}}$  (рис.1).

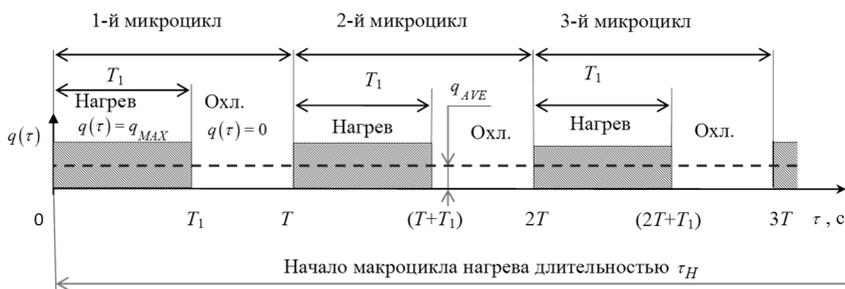


Рис.1. Пульсирующий тепловой поток с плотностью  $q(\tau)$ :  $0T_1$  и  $T_1T$  – интервалы времени нагрева и охлаждения (отсутствия нагрева), образующие микроциклы прерывистого шлифования с периодом микроцикла  $T$ .

Во время работы режущего выступа (нагрев) в зоне контакта действует тепловой поток  $q(\tau) = q_{MAX}$ , а во время отсутствия резания (охлаждение) –  $q(\tau) = 0$  (рис.1). Таким образом, тепловой поток, воздействующий на обрабатываемую поверхность, можно представить в виде следующей ступенчатой функции [3]

$$q(\tau) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ q_{MAX}, & nT < \tau < nT + T, & n = 0, 1, \dots \\ 0, & nT + T_1 < \tau < (n+1)T, & n = 0, 1, \dots \end{cases}$$

Непрерывная последовательность микроциклов располагается на участке одного макроцикла нагрева, длительность которого как для сплошного, так и для прерывистого круга определяется временем действия теплового источника – зоны контакта при шлифовании  $\tau_H$ , которое можно определить по формуле (1).

По мере увеличения числа  $N$  режущих выступов на периферии круга увеличивается количество микроциклов шлифования при одновременном уменьшении периода  $T$  каждого микроцикла (рис.1). При  $180 \leq N \leq 350$  длина режущего выступа шлифовального круга  $l_1$  становится равной габаритному размеру режущих зерен круга в интервале его зернистости 25...50, а длина впадины  $l_2$ , становится равной расстоянию между режущими зернами. Это подтверждается данными, приведенными в работе [4], в которой показано, что среднее расстояние между режущими зернами на рабочей поверхности круга составляет 3,3...6,1 мм в интервале изменения радиальной силы 20...50 Н/см.

Следовательно, появляется возможность с единых позиций рассмотреть температурное поле при прерывистом (дискретном) шлифовании (рис.1): когда режущие выступы – искусственные образования на сплошном круге, и когда они – отдельные режущие зерна круга. Для этого необходимо разработать условия обеспечения сопоставимости (преемственности) теплофизических расчётных схем. Применительно к высокопористым шлифовальным кругам (ВШК) такие условия разработать легче, поскольку можно допустить отсутствие влияния связки круга на потребляемую мощность резания.

**Анализ последних достижений.** В соответствии с известной методикой [5] входными параметрами, характеризующими температуру прерывистого шлифования

$\theta^*(u, Fo_1, n)$ , являются следующие величины:  $u = \frac{Vh}{a}$ ,

$$Fo_1 = \frac{\alpha l_1}{h^2} = \frac{al_1}{h^2 V_{кр}} \text{ и } n = \frac{l_2}{l_1},$$

где  $u$  – безразмерный комплекс скорости;  $Fo_1$  – безразмерное время действия теплового импульса;  $a$  – температуропроводность обрабатываемого материала,  $m^2/c$ .

Условием выбора геометрических параметров ПШК является предварительно заданная степень понижения температуры прерывистого шлифования. Среди указанных входных параметров геометрическим параметром круга является только  $n = \frac{l_2}{l_1}$ . Другие параметры ( $u$  и  $Fo_1$ ) зависят также от

режимов шлифования. Кроме того, в этой методике не учитывается, что сравниваемые геометрические конструкции ПШК предназначены для совершения одной и той же работы резания. Поэтому в этой методике эквивалентные по температуре шлифования конструкции ПШК не обеспечивают одинакового съёма материала в единицу времени.

Что касается определения температурного поля от отдельных зёрен круга, то в работе [4] такая попытка делается с применением метода суперпозиции с учётом многократного действия источников – режущих зёрен, однако величину плотности теплового потока от действия режущего зерна находят расчётным путём через интенсивность напряжения, а не мощность резания.

**Выделение нерешенных частей проблемы.** Необходимо получить зависимость температуры прерывистого шлифования только от геометрических параметров ПШК, к числу которых относятся количество  $N$  режущих выступов на круге и их скважность (или коэффициент заполнения) на окружном шаге. Кроме того, в работе [5] не учитывается важное дополнительное условие, которое необходимо выдержать применительно ко всем сравниваемым по температуре шлифования ПШК. А именно: при изменении числа режущих выступов на круге и их скважности на периоде окружного шага объём снимаемого

материала в единицу времени (показатель интенсивности шлифования) должен быть одним и тем же. Т.е. необходимо учитывать, что при нахождении впадины прерывистого круга в зоне контакта отсутствие теплового потока сопровождается отсутствием съёма материала, а это приводит к соответствующей дополнительной нагрузке на последующий режущий выступ круга и, как следствие, к дополнительной добавке (т.е. возрастанию) теплового потока на этом режущем выступе. В соответствии с предлагаемой методикой сформулировано условие постоянства интенсивности шлифования (работы шлифования), которое необходимо обеспечивать для всех сравниваемых между собой конструкций прерывистых кругов.

Условие постоянства интенсивности шлифования (объём удаляемого в единицу времени материала) на временном участке  $0 \leq \tau \leq \tau_H$  д очевидно должно сопровождаться постоянством мощности, затрачиваемой на резание, которая может быть найдена из известного соотношения. Например, для плоского шлифования

$$P = q_{AVE} S_n \sqrt{Dt} ,$$

где  $P$  – измеренная мощность резания (средняя величина периодически изменяющейся мощности), Вт;  $q_{AVE}$  – средняя плотность теплового потока (рис.1), Вт/м<sup>2</sup>;  $D$  – диаметр шлифовального круга, м;  $t$  – глубина резания, м;  $S_n$  – поперечная подача, м.

Следовательно, постоянство мощности шлифования при фиксированных режимных параметрах ( $t, S_n$ ) и диаметре шлифовального круга ( $D$ ) сопровождается постоянством плотности теплового потока. Поэтому указанное выше условие сравнения кругов (одинаковая работа резания шлифования), обеспечивается при постоянстве (для разных конструкций ПШК) удельного параметра  $q_{AVE}$  – средней плотности теплового потока.

**Целью исследований** является разработка методики определения температуры прерывистого и высокопористого

шлифования при одинаковой интенсивности шлифования для разных геометрических параметров ПШК по мере увеличения числа  $N$  режущих выступов на круге. Причем увеличение  $N$  производят до такого их количества ( $180 \leq N \leq 350$ ), при котором протяженность режущего выступа  $l_1$  становится сопоставимой по величине с габаритным размером режущего зерна при обработке поверхности в тех же условиях высокопористыми шлифовальными кругами (ВШК). Для этого необходимо: разработать математическую модель для определения температуры дискретного (прерывистого и высокопористого) шлифования, выбрать и оптимизировать варьируемые геометрические параметры ПШК и размеры зёрен ВШК исходя из наименьшей температуры прерывистого и высокопористого шлифования.

**Основной материал с обоснованием результатов.** В качестве модели для определения температуры прерывистого шлифования использовано решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности при пульсирующем тепловом потоке на поверхности [3].

В этом решении установившаяся температура  $\Theta_{SUM}$  от воздействия на поверхность полуограниченного тела прерывистого (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  $q_{AVE}$ , причём [3].

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

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 микроцикла плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·°С).

Вторая составляющая  $\Theta_P = \Theta_P(q_{MAX})$  – импульсная периодическая, зависит от максимального уровня плотности теплового потока  $q_{MAX}$  и его протяжённости во времени на периоде микроцикла (рис.1), причём [3]:  
в интервале  $0 < p < s$  (нагрев)

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

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

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

где  $s = \frac{T_1}{T}$  – коэффициент заполнения или величина обратная скажности прямоугольного импульса теплового потока;  $p = \frac{\tau}{T}$  – безразмерное (относительное) время в интервале микроцикла шлифования  $0 \leq \tau \leq T$ . В формулах (4) и (5) используется выражение [3]

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

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 этой модели является неопределённость этого временного интервала, который наступает после окончания переходного процесса установления температуры. Это сдерживает применение модели (2)...(5) для проектирования оптимальных конструкций ПШК и соответствующих рецептур ВШК.

Предлагается следующий подход к определению температурного поля при дискретном (прерывистом и высокопористом шлифовании) воздействии теплового потока. Известно, что при отсутствии принудительного охлаждения обрабатываемой поверхности к температурным полям от действия смещенных во времени дискретных источников тепла применим принцип суперпозиции: смещённые по времени температурные поля от дискретных источников тепла можно складывать путём суммирования температур в одних и тех же пространственных координатах. Сущность принципа суперпозиции применительно к прерывистому шлифованию заключается в следующем. Температурное поле от отдельного прямоугольного импульса теплового потока, действующего на интервале времени  $0 \leq \tau \leq T_1$  (рис.1), может быть заменено суммой температурных полей от действия двух непрерывных по времени источников. Первый тепловой источник является положительным ( $+q_{MAX}$ ). Он непрерывно действует на интервале времени  $0 \leq \tau \leq \infty$ . Второй тепловой источник (сопрягаемый с первым источником) является отрицательным источником ( $-q_{MAX}$ ). Он действует непрерывно на интервале времени  $T_1 \leq \tau \leq \infty$ . Такая методика представления одиночного импульса теплового потока известна применительно к одиночному интервалу времени действия теплового потока при обычном шлифовании сплошным кругом [2]. Длительность  $\tau_H$  этого интервала характеризует макроцикл шлифования (рис.1). Применительно к прерывистому кругу такой способ представления одиночного импульса теплового потока сохраняется, только вместо времени макроцикла  $\tau_H$  используется время микроцикла  $T_1$ . Такая попытка сделана в работе [6], однако величина плотности теплового потока в полученной зависимости является переменной. Это некорректно в связи с нарушением принципиального требования  $q_{MAX} = const$ , при котором получено решение соответствующего дифференциального уравнения для определения температуры шлифования.

Применяя принцип суперпозиции, например, для первых пяти микроциклов нагрева и охлаждения температурное поле описывается зависимостью, представляющей собой сумму пяти разностей. Обозначив  $q_{MAX} = q$ , получим выражение для температуры, вызванной воздействием первых пяти микроциклов шлифования  $T_5 = T_5(q, \tau)$

$$\begin{aligned}
 T_5 = & \frac{2q}{\lambda} \left( \sqrt{a\tau} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \sqrt{a(\tau - T_1)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - T_1)}} + \right. \\
 & + \sqrt{a(\tau - T)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - T)}} - \sqrt{a(\tau - T - T_1)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - T - T_1)}} + \\
 & + \sqrt{a(\tau - 2T)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - 2T)}} - \sqrt{a(\tau - 2T - T_1)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - 2T - T_1)}} + \\
 & + \sqrt{a(\tau - 3T)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - 3T)}} - \sqrt{a(\tau - 3T - T_1)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - 3T - T_1)}} + \\
 & \left. + \sqrt{a(\tau - 4T)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - 4T)}} - \sqrt{a(\tau - 4T - T_1)} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - 4T - T_1)}} \right). \quad (6)
 \end{aligned}$$

Для ПШК общее количество импульсов  $n$  (число микроциклов прерывистого шлифования) на интервале времени нагрева  $0 \leq \tau \leq \tau_H$  можно определить по формуле [6]

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

На основе зависимости (6) для любого числа  $n$  методом суперпозиции может быть получена следующая рекуррентная формула для определения температуры  $T = T(q, \tau)$  на участке нагрева

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

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,  $V_{кр}=35$  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·°C),  $a=8 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/с.  
 Т°С

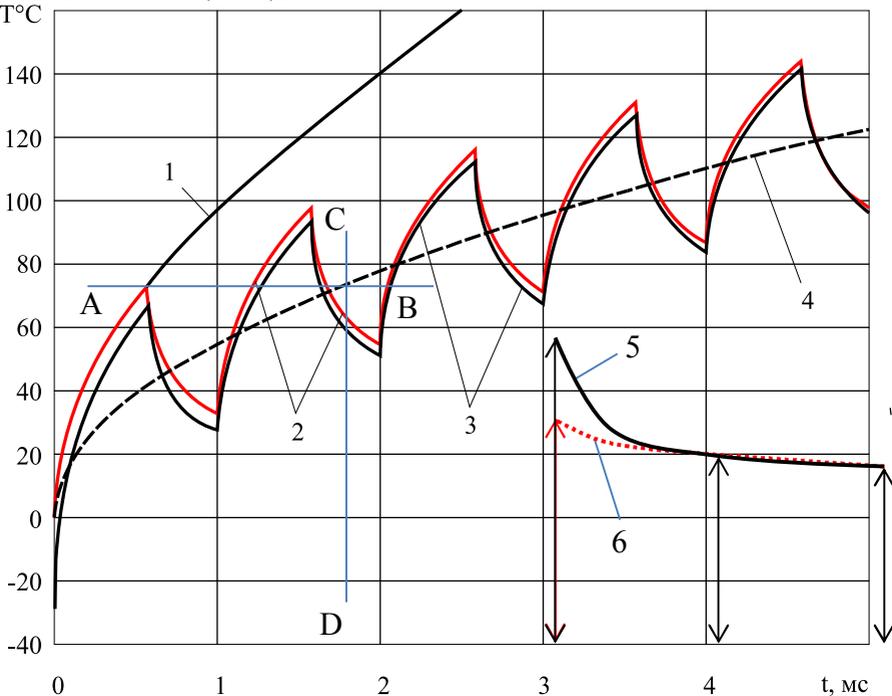


Рис.2. Температура шлифования в начале макроцикла нагрева на участке переходного процесса: 1 — от воздействия постоянной плотности теплового потока  $q(\tau) = q_{MAX} = 40$  Вт/мм<sup>2</sup>; 2 — полученная методом суперпозиции по уравнению (8); 3 — суммарная установившаяся температура по модели (2)...(5); 4 — непрерывно возрастающая часть установившейся температуры по уравнению (3).

При этих условиях  $l_1 + l_2 = 35$  мм, число режущих выступов на прерывистом круге  $N=35$ , время одного полного оборота круга 35 мс, время воздействия неподвижного плоского теплового источника  $\tau_H = 100$  мс, количество оборотов круга за

время  $\tau_H$  - 2,9. Таким образом, в состав одного макроцикла прерывистого шлифования длительностью  $\tau_H = 100$  мс входит 100 микроциклов длительностью  $T = 1$  мс, при этом за время одного оборота круга происходит 35 микроциклов шлифования.

Время действия режущего выступа составляет

$$T_1 = \frac{l_1}{V_{кр}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{35} = 0,5714 \cdot 10^{-3} \text{ с (0,5714 мс)}.$$

Время отсутствия теплового импульса (над точкой контакта проходит впадина длиной

$$T - T_1 = \frac{l_2}{V_{кр}} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{35} = 0,42857 \cdot 10^{-3} \text{ с (0,4286 мс)}.$$

Коэффициент заполнения периода прямоугольного импульса

$$s = \frac{T_1}{T} = \frac{0,5714}{1} = 0,5714.$$

Из анализа данных на рис.2 видно, что математическая модель (2)...(5) дает наибольшую погрешность на интервале первого микроцикла шлифования: суммарная температура, полученная по формуле (2), изменяется от  $-27^\circ\text{C}$  до  $+66^\circ\text{C}$  (кривая 3), в то время как температура, полученная методом суперпозиции по формуле (8), изменяется от 0 до  $+73^\circ\text{C}$  (кривая 2). Начиная со второго микроцикла и далее различие между графиками 2 и 3, построенными по формулам (2)...(5) и (8), уменьшается, что вызвано затуханием переходного процесса изменения температуры. Затухающие по величине амплитуды 1-ого, 3-ого и 5-ого импульсов для кривых 3 и 2 изменяются, стабилизируясь, по графикам 5 и 6, соответственно (рис.2). Непрерывно возрастающая составляющая температуры (кривая 4 на рис.2) является экспоненциально подобной, однако в отличие от экспоненциального закона медленнее стабилизируется, продолжая нарастать. Причем, это нарастание происходит с замедляющимся темпом по мере увеличения длительности макроцикла шлифования на интервале  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ . Начиная с 5-ого импульса различием между графиками 2 и 3 (рис.2) можно пренебречь, переходный процесс заканчивается,

так как относительная ошибка при определении максимальной температуры не превышает 2 %.

Найденному выше эмпирическим способом времени переходного процесса соответствует постоянная времени, которую можно найти из следующего условия. Максимальное значение амплитуды первого импульса температуры, полученного методом суперпозиции (прямая АВ на рис.2) равно непрерывно возрастающей компоненте температуры (точка пересечения прямой АВ с кривой 4). Линия CD, проходящая через указанную точку пересечения отсекает на абсциссе координату времени, равную постоянной времени.

Это можно записать математическим условием

$$\frac{2q_{MAX}}{\lambda} \sqrt{\frac{aT_1}{\pi}} = \frac{2q_{AVE}}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau_t}{\pi}}, \quad (9)$$

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

Учитывая соотношение между параметрами  $q_{MAX}$  и  $q_{AVE}$ , из (9) получаем

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

где  $Q$  – скважность прямоугольного импульса теплового потока ( $Q > 1$ ).

Для рассматриваемого случая ( $s = 0,5714$ ) постоянная времени переходного процесса  $\tau_t$  по формуле (10) составляет

$$\tau_t = \frac{1}{0,5714} = 1,75 \text{ мс}.$$

Известно, что время экспоненциального переходного процесса, при котором выходная величина принимает 95 % от своего установившегося значения, приблизительно равно утроенному значению постоянной времени изменения выходной величины (температуры). Исходя из этого правила с учётом формулы (10), время переходного процесса  $T_t$  составит

$$T_t = 3\tau_t = 3\frac{T}{s} = 3TQ < \tau_H. \quad (11)$$

Для данного случая время переходного процесса  $1,75 \cdot 3 = 5,25$  мс, что соответствует выбранному интервалу времени на рис.2.

Общая формулировка задачи оптимизации заключается в определении геометрических параметров ПШК, которые обеспечивают наименьшую максимальную температуру шлифования на интервале времени действия теплового источника при шлифовании  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ . Максимальное время действия, при котором температура шлифования максимальна, например, применительно к плоскому шлифованию определяют по формуле (1).

Для решения задачи оптимизации в интервале времени установившихся значений температур  $T_l < \tau < \tau_H$  по уравнениям (2)..(5) определены максимальные температуры прерывистого шлифования в зависимости от количества выступов ( $N$ ) на прерывистом круге, которое изменяли от 3 до 350. Графики построены для трех различных значений коэффициента заполнения  $s = \frac{T1}{T} : 0,2; 0,5; 0,8$  (рис.3).

Видно, что зависимость  $\Theta_{SUM}(N)$ , полученная при фиксированном значении  $s$ , является нелинейной. Температура резко уменьшается на начальном интервале изменения  $N$ , а затем незначительно продолжает уменьшаться. Уменьшение параметра  $s$  от  $s = 0,8$  (кривая А на рис.3) до  $s = 0,2$  (кривая С) приводит к увеличению максимальной температуры во всём интервале изменения числа режущих выступов  $N$ . В указанном диапазоне изменения  $s$  наименьшая температура имеет место при  $s = 0,8$ .

Критерий оптимизации для определения оптимальных геометрических параметров прерывистых кругов – наименьшая температура прерывистого шлифования в зоне резания. При этом необходимо обеспечить условие одинаковой интенсивности шлифования для всех сравниваемых ПШК, которое приводит к постоянству средней плотности теплового потока на микроцикле шлифования.

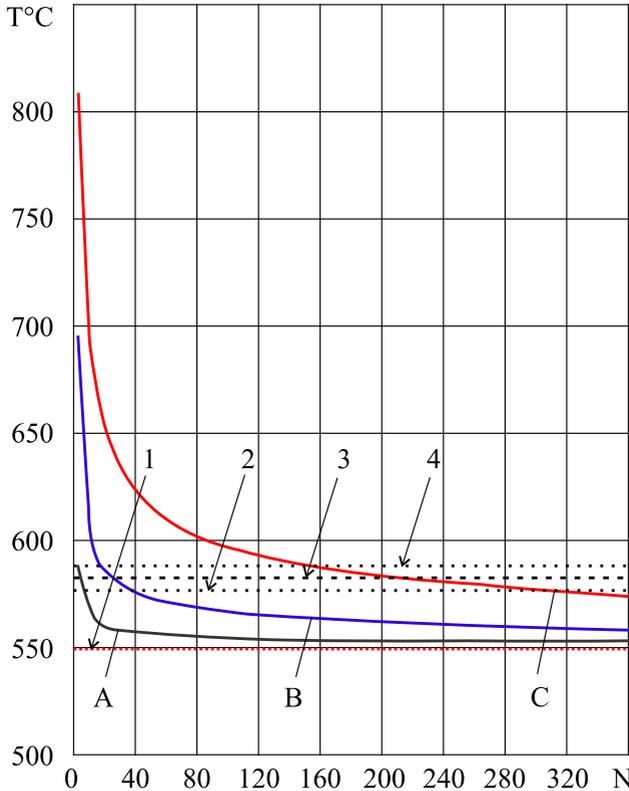


Рис.3. Изменение температуры  $T^{\circ}\text{C} = \Theta_{\text{SUM}}(N)$  прерывистого шлифования при  $q_{\text{AVE}} = \text{const} = 22,856 \text{ Вт/мм}^2$  в зависимости от числа режущих выступов ( $N$ ) шлифовального круга при различном коэффициенте заполнения  $s$ : A, B и C –  $s = 0,8$ ;  $0,5$  и  $0,2$ .

Учитывая характер изменения графиков на рис.3 (резкое уменьшение температуры на начальном участке и дальнейшее незначительное ее понижение) примем следующую методику определения оптимальных величин  $N$  и  $s$ .

1. Проводят линию, параллельную оси  $OX$  на уровне температуры, соответствующей максимальному на интервале  $0 \leq \tau \leq \tau_H$  значению установившейся составляющей температуры, т.е. температуре  $\Theta_R(\tau_H)$  при  $\tau = \tau_H$  (рис.1). В

данном случае эта температура составляет  $549,226^{\circ}\text{C}$  (линия 1). Параллельно этой линии и выше ее, например выше на 5, 6 и 7 % от уровня  $549,226^{\circ}\text{C}$  проводят три параллельные прямые (линии 2,3, и 4) таким образом, чтобы каждая из этих прямых пересекала все три графика. Находят интервалы для оптимальных значений  $N$  для каждого из графиков, построенных при следующих значениях  $s$ : 0,2; 0,5 и 0,8. Например, уровни температур, соответствующие 5 %, 6 % и 7 % следующие (рис.3):  $576,69^{\circ}\text{C}$  (линия 2);  $582,18^{\circ}\text{C}$  (линия 3);  $587,59^{\circ}\text{C}$  (линия 4).

В соответствии с рассмотренной методикой получены интервалы изменения оптимального числа  $N$  при различных значениях  $s$  (табл.1)

Таблица 1

*Оптимальные интервалы геометрических параметров ПШК*

Минимальные уровни температур	$s$		
	0,2	0,5	0,8
5 % ( $576,69^{\circ}\text{C}$ )	$N \geq 311$	$N \geq 40$	$N \geq 7$
6 % ( $582,18^{\circ}\text{C}$ )	$N \geq 228$	$N \geq 25$	$N \geq 5$
7 % ( $587,59^{\circ}\text{C}$ )	$N \geq 152$	$N \geq 17,8$	$N \geq 3$

Видно, что наименьшие значения  $N$  (7, 5, 3) имеют место при  $s = 0,8$  в последовательности, построенной в порядке возрастания минимальных уровней температур. С увеличением  $s$  от 0,2 до 0,8 при одном и том же минимальном уровне температур значения  $N$  уменьшаются.

При повышении минимального уровня температуры на 2 % (с 5 до 7 %) количество рекомендуемых выступов уменьшается более, чем в 2 раза, например, для  $s = 0,8$  – от 7 до 3, а для  $s = 0,2$  – от 311 до 152. При выполнении на шлифовальном круге выступов в количестве  $N \geq 152$ ;  $N \geq 228$  и  $N \geq 311$  требования к параметру  $s$  снижаются. Так как самые низкие температуры имеют место при большом количестве выступов при любом коэффициенте заполнения  $s$ .

Установленная закономерность уменьшения температуры прерывистого шлифования по мере увеличения  $N$  и  $s$  отражает наметившуюся тенденцию замены прерывистых кругов соответствующими по габаритным размерам высокопористыми шлифовальными кругами (ВШК). При большом количестве режущих зерен (на порядок и больше числа режущих выступов ПШК), расположенных на периферии ВШК, требования к скважности их расположения на окружном шаге уменьшаются. Эта тенденция характеризует переход от макро- (ПШК) к микропрерывистости (ВШК). Преимуществом ВШК, по сравнению с ПШК, является отсутствие дополнительной механообработки по формированию режущих выступов на круге, поскольку тепловые источники – режущие зёрна круга формируются естественным образом при изготовлении ВШК. По данным работы [4] определены параметры дискретных тепловых источников – зёрен и мгновенная максимальная температура под зерном (табл.2). При этом использованы следующие новые обозначения:  $z_{\phi}$  – фактическое число режущих зёрен на площадке контакта;  $S_{\text{зерн}}$  - площадь контакта абразивного зерна с заготовкой  $P_{\text{зерн}}$  - мощность резания, приходящаяся на одно режущее зерно

Таблица 2.

*Расчётные параметры тепловых источников – зёрен.*

Размер зерна, мм	$l_1$ мм	$l_2$ мм	$l_1 + l_2$ мм	$Q$	$z_{\phi}$	$S_{\text{зерн}}$ мм <sup>2</sup>
0,25	0,25	3,35	3,60	14,00	3,94	0,0490
0,40	0,40	4,30	4,70	11,76	3,07	0,1256
0,50	0,50	6,00	6,50	13,00	2,20	0,1960

Продолжение табл. 2.

Размер зерна, мм	$P_{\text{зерн}}$ Вт/зерно	$q_{\text{MAX}}$ Вт/мм <sup>2</sup>	$q_{\text{AVE}}$ Вт/мм <sup>2</sup>	$N$	$n$	$\Theta_{\text{SUM}}$ °C
0,25	76,57	1562,73	111,578	340,30	972,280	2897
0,40	98,27	782,4	66,200	260,68	742,857	1716
0,50	137,14	699,69	53,800	188,49	538,500	1450

Видно, что мгновенные максимальные температуры от действия отдельных режущих зёрен составляют 1716...2897°С, что превышает температуру плавления обрабатываемого материала. Однако при этом необходимо учитывать, что это теоретические (расчётные) температуры, которые после приведения их к средней температуре на площадке контакта изменяются в интервале, показанном на рис.3.

### **Выводы**

1. Наиболее рациональные конструктивные параметры ПШК выбирают исходя из следующих установленных закономерностей:

- увеличение числа  $N$  режущих выступов ПШК при постоянном коэффициенте заполнения  $s$  (величина обратная скважности импульсов теплового потока) приводит к снижению температуры шлифования (например, при коэффициенте заполнения  $s = 0,5$  увеличение числа режущих выступов от 3 до 35 приводит к снижению температуры от 646,392 С до 577,375 С).

- увеличение коэффициента заполнения  $s$  при постоянном числе режущих выступов ПШК также приводит к снижению температуры шлифования (например, при числе режущих выступов  $N = 15$  увеличение коэффициента заполнения  $s$  от 0,2 до 0,8 приводит к уменьшению температуры от 666,101°С с до 562,225°С).

- одновременное увеличение  $N$  (число режущих выступов) и  $s$  (коэффициент заполнения) приводит к более эффективному, чем в указанных выше случаях, снижению температуры шлифования (например, одновременное увеличение  $N$  от 3 до 35 и  $s$  от 0,2 до 0,8 приводит к снижению температуры от 808,088°С до 557,753°С).

2. При выборе числа режущих выступов ПШК по иным, чем температура факторам (при малых периметрах кругов не удастся изготовить большое количество  $N$  режущих выступов, с ростом числа  $N$  режущих выступов увеличивается трудоёмкость механических работ по изготовлению ПШК и т.п.) необходимо пользоваться полученными рекомендациями по выбору скважности режущих выступов (табл.). Например,

при  $N = 3$  необходимо выбирать коэффициент заполнения  $s \geq 0,8$ , а при  $N = 35 - s \geq 0,5$ . Т.е. с ростом числа  $N$  требования к скважности режущих выступов уменьшаются. Например, при  $N = 300$  коэффициент заполнения  $s$  выбирают из условия  $s \geq 0,2$  (при  $s < 0,2$  температура будет дополнительно и значительно увеличиваться), в то время как при  $N = 3 - s \geq 0,9$  (при  $s < 0,9$  температура будет дополнительно и значительно увеличиваться).

3. Установленная закономерность уменьшения температуры прерывистого шлифования по мере увеличения численных значений  $N$  и  $s$  отражает наметившуюся тенденцию замены прерывистых кругов соответствующими по габаритным размерам высокопористыми шлифовальными кругами (ВШК), например, кругами фирмы Winterthur Technology Group (Швейцария), отдельные режущие зерна которых эквиваленты режущим выступам ПШК. При большом количестве режущих зерен (на порядок и больше числа режущих выступов ПШК), расположенных на периферии ВШК требования к скважности их расположения уменьшаются (см. п.2). Эта тенденция характеризует переход от макро – (ПШК) к микропрерывистости (ВШК).

#### **Список литературы**

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. – // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2011. – Вып. 2(36) . – С. 80 – 86.
3. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
4. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
5. Якимов, А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. – Киев–Одесса: Вища школа, 1986. – 175 с.
6. Якимов, А.В. Технология машиностроения: Учебник /А.В. Якимов, В.Н. Царюк, А.А. Якимов и др. – Одесса: Астропринт, 2001 . – 608 с.