

Лищенко<sup>1</sup> Н.В. к.т.н., Ларшин<sup>2</sup> В.П. д.т.н., проф.

1 - Одесская национальная академия пищевых технологий, г.Одесса, Украина;

2 - Одесский национальный политехнический университет, г.Одесса, Украина

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕРЫВИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Lishchenko N.<sup>1</sup>, Larshin V.<sup>2</sup>

1 - Odessa National Academy of Food Technology, Odessa, Ukraine;

2 - Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine (VPLarshin@rambler.ru)

### OPTIMIZATION OF DISCONTINUED GRINDING WHEEL GEOMETRICAL PARAMETERS

*Разработана и исследована математическая модель для определения температуры прерывистого шлифования с учетом геометрических параметров прерывистых шлифовальных кругов (ПШК). Установлено, что температура прерывистого шлифования содержит две составляющие: непрерывно возрастающую и периодическую импульсную. Исследован переходный процесс изменения температуры, установлена зависимость для определения времени переходного процесса. Сформулирован критерий оптимизации процесса: минимальная температура прерывистого шлифования и установлены закономерности ее изменения. Разработаны рекомендации по выбору геометрических параметров ПШК.*

*Ключевые слова:* прерывистое шлифование, температура, геометрические параметры ПШК.

**Введение.** При шлифовании (например, плоском) зона контакта круга с заготовкой представляет собой прямоугольную полоску шириной  $2h$  (мм), которая перемещается относительно заготовки со скоростью детали  $V_0$  (м/мин). Радиус кривизны этой полоски равен половине диаметра шлифовального круга, что намного превышает величину  $2h$ . Поэтому кривизной полоски 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 полоски, 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

$$\tau_H = \frac{2h}{V_0} = \frac{\sqrt{Dt}}{V_0}, \quad (1)$$

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 создается, соответственно, неподвижным плоским тепловым источником, действующим на поверхности полубесконечного тела в течение времени  $\tau_H$  и пространственной координатой  $z$  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).

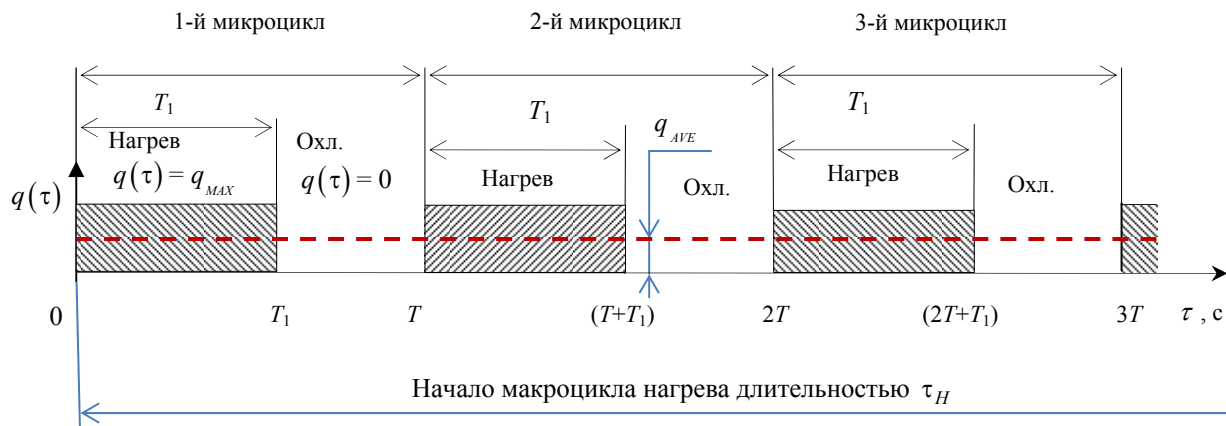


Рис. 1. Пульсирующий тепловой поток с плотностью  $q(\tau)$ :  $0T_1$  и  $T_1T$  — интервалы времени нагрева и охлаждения (отсутствия нагрева), образующие микроциклы прерывистого шлифования с периодом микроцикла  $T$

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]

$$q(\tau) = q_{MAX}, \text{ при } nT < \tau < nT + T_1, \quad n = 0, 1, \dots$$

$$q(\tau) = 0, \text{ при } nT + T_1 < \tau < (n+1)T, \quad n = 0, 1, \dots$$

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

В соответствии с известной методикой [4] входными параметрами, характеризующими температуру прерывистого шлифования  $\theta^*(u, Fo_1, n)$ , являются следующие величины:  $u = \frac{Vh}{a}$ ,  $Fo_1 = \frac{a\tau_1}{h^2} = \frac{al_1}{h^2V_{кр}}$  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 [4]. 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 съема материала в единицу времени.

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 [4] 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 резания), которое необходимо обеспечивать для всех сравниваемых между собой конструкций прерывистых кругов.

Условие постоянства работы резания 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 при фиксированных режимных параметрах ( $t, S_n$ ) и диаметре шлифовального круга ( $D$ ) сопровождается постоянством плотности теплового потока. Поэтому указанное выше условие сравнения кругов (одинаковая производительность шлифования), обеспечивается при постоянстве удельного параметра  $q_{AVE}$  – средней плотности теплового потока.

**Целью исследований** является разработка методики оптимизации геометрических параметров ПШК. Для этого необходимо: разработать математическую модель для определения температуры прерывистого шлифования, выбрать и оптимизировать варьируемые геометрические параметры ПШК исходя из наименьшей температуры прерывистого шлифования. Для чего необходимо установить возможные интервалы изменения выбранных параметров, составить план вычислительного эксперимента с наименьшим количеством возможных сочетаний варьируемых геометрических параметров ПШК, выполнить вычисление и анализ температуры прерывистого шлифования при указанных сочетаниях геометрических параметров и сформировать рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров ПШК.

**Изложение основного материала.** 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  $q_{AVE}$ . Вторая составляющая  $\Theta_P = \Theta_P(q_{MAX})$  – импульсная периодическая, зависит от максимального уровня плотности теплового потока  $q_{MAX}$ . При этом [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 импульса плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·°С).

В формуле (2) периодическая часть установившейся температуры определяется по следующим зависимостям на интервале одного микроцикла шлифования [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  $0 \leq \tau \leq T$ .

В формулах (4) и (5) используется выражение

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

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 для диагностики процесса прерывистого шлифования.

Предлагается следующий подход к определению температурного поля при прерывистом воздействии теплового потока. Известно, что при отсутствии принудительного охлаждения обрабатываемой поверхности к температурным полям от действия смещённых во времени различных источников применим принцип суперпозиции: смещённые по времени температурные поля 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 [5], 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 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

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

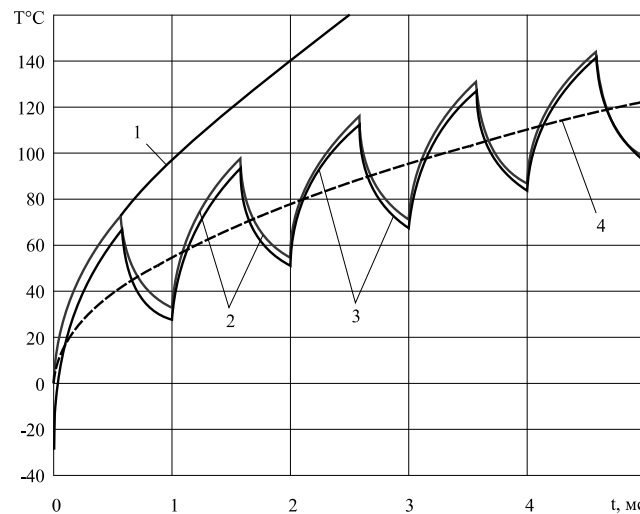
Для прерывистого круга общее количество импульсов  $n$  (число микроциклов прерывистого шлифования) на интервале времени нагрева  $0 \leq \tau \leq \tau_H$  можно определить по формуле [5]

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

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

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

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.



**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  $l_2$ )

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

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. 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 различие 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.

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

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

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

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

где  $Q$  – скважность прямоугольного импульса теплового потока.

Для рассматриваемого случая ( $s = 0,5714$ ) постоянная времени переходного процесса  $\tau_i$  по формуле (10) составляет  $\tau_i = \frac{1}{0,5714} = 1,75$  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  $T_i$  составит

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

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

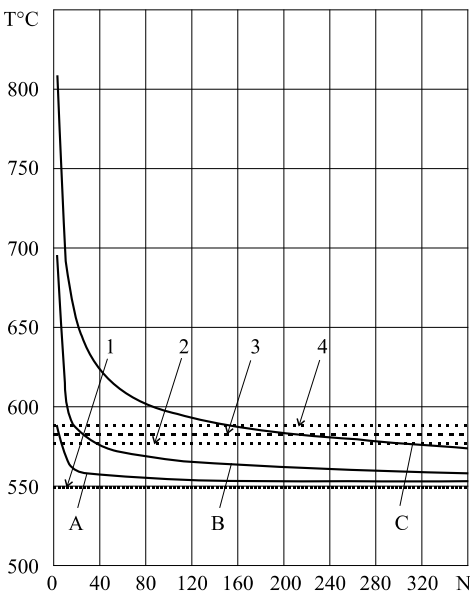
Общая формулировка задачи оптимизации заключается в определении геометрических параметров ПШК, которые обеспечивают наименьшую максимальную температуру шлифования на интервале времени действия теплового источника при шлифовании  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ . Максимальное время действия, при котором температура

шлифования максимальна, например, применительно к плоскому шлифованию определяют по формуле (1).

Для решения задачи оптимизации в интервале времени установившихся значений температур  $T_i < \tau < \tau_H$  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,



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

которое приводит к постоянству средней плотности теплового потока на микроцикле шлифования.

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 ОХ 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.)

Таблица

**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 уменьшаются (см. п.2). Эта тенденция характеризует переход от макро- (ПШК) к микропрерывистости (ВШК). Преимуществом ВШК, по сравнению с ПШК, является отсутствие дополнительных механических работ по формированию режущих выступов на круге.

### 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  $646,392^\circ\text{C}$  до  $577,375^\circ\text{C}$ ).

- 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  $666,101^\circ\text{C}$  с до  $562,225^\circ\text{C}$ ).

- 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  $808,088^\circ\text{C}$  до  $557,753^\circ\text{C}$ ).

2. При выборе числа режущих выступов ПШК по иным, чем температура факторам (при малых периметрах кругов не удается 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  $s \leq 0,9$  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).

**Анотація.** Розроблена і досліджена математична модель для визначення температури переривчастого шліфування з урахуванням геометричних параметрів переривчастих шліфувальних кругів (ПШК). Встановлено, що температура переривчастого шліфування містить дві складові: що безперервно зростає і періодичну імпульсну. Досліджений перехідний процес зміни температури, встановлена залежність для визначення часу перехідного процесу. Сформульований критерій оптимізації процесу – мінімальна температура переривчастого шліфування і встановлені закономірності її зміни. Розроблені рекомендації по вибору геометричних параметрів ПШК.

**Ключові слова:** переривчасте шліфування, температура, геометричні параметри переривчастих шліфувальних кругів.

#### Abstract

**Purpose.** Because in known techniques entry parameters characterizing not only grinding wheel geometry, but also grinding modes, it is necessary to work out the techniques with entry parameters which invariant to the modes of grinding.

**Design/methodology/approach.** The superposition method created a mathematical model for determination of discontinued grinding wheel temperature. As a result a possibility was to compare the model with the known one. It gave the condition to find time constant and evaluate transient time after which the both models will be identical to the temperature calculated. The benefits of this study are a new presentation of the grinding temperature consisting of a periodic part superposed on the rising temperature due to the average surface flux. The values of both parts are given and analyzed and then used to find the minimum grinding temperature by changing the discontinued grinding wheel geometry parameters: the number of cutting ledges and their fill factor on the discontinued wheel circuitous step. The more the parameters mentioned the less the discontinued grinding temperature will be. The study allows choosing the optimal geometrical parameters of the discontinued grinding wheel on the bases of conformities to law of influence of discontinued grinding wheel geometrical parameters on the grinding temperature. Corresponding recommendations on the choice of discontinued grinding wheel geometrical parameters are presented in some detail as thoroughly as possible.

**Findings.** The each optimal geometrical parameter intervals of discontinued grinding wheel that does not depend on the grinding modes are found.

**Originality/value.** The change intervals of the each optimal parameters of discontinued grinding wheel were chosen depending on the minimum discontinued grinding temperature.

**Keywords:** discontinued grinding, temperature, geometrical parameters of discontinued grinding wheel.

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 // 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. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. — Киев—Одесса: Вища школа, 1986. — 175 с.
5. Технология машиностроения: Учебник / [Якимов А.В., Царюк В.Н., Якимов А.А. и др.]; под ред. А.В. Якимова.— Одесса: Астропринт, 2001. — 608 с.

#### REFERENCES

1. Sipaylov V.A. Teplovye processy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverhnosti. [Thermal processes in grinding and surface quality control]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 167 p.
2. Lishchenko N.V. Issledovanie vlijaniya smazочно-ohlazhdajuwej zhidkosti na temperaturu shlifovanija. [Investigation of metal-cutting coolant's influence on the grinding temperature]. Tr. Odes. politehn. un-ta, Odessa, 2011, Vyp. 2(36), PP. 80 – 86.
3. Karslou G., Yaeger D. Teploprovodnost' tverdyh tel. [Conduction of heat in solids], Moscow: Nauka, 1964, 487 p.
4. Yakimov A.V. Preryvistoe shlifovanie. [Discontinued grinding], Kyiv—Odessa: Vishcha shkola, 1986, 175 p.
5. Yakimov A.V., Tsaryuk V.N., Yakimov A.A. i dr. Tehnologija mashinostroenija: Uchebnik. [Manufacturing technology], Odessa: Astroprint, 2001, 608 p.