

С.Ю. Дмитриева, Одесса, Украина

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕРЫВИСТЫХ КРУГОВ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛИФОВАНИЯ

Проведено теоретичні дослідження, спрямовані на визначення геометричних параметрів прерывчастих кіл, при шліфуванні якими створюються умови, які спричиняють необхідну якість поверхневого шару деталі.

Проведены теоретические исследования, направленные на определение геометрических параметров прерывистых кругов, при шлифовании которыми создаются условия, предопределяющие требуемое качество поверхностного слоя детали.

Theoretical research aimed at determining the geometric parameters of discontinuous circles, which are created by grinding conditions predetermine the required quality of the surface layer of the part.

1. Постановка проблемы. Основным ограничивающим фактором повышения производительности и качества при шлифовании является возникновение высоких температур резания, которые приводят к различного рода температурным дефектам поверхностного слоя обрабатываемой детали, ухудшающим ее эксплуатационные свойства. [2], [4].

Существует множество методик расчета геометрических параметров прерывистых абразивных кругов, обеспечивающих снижение температуры до требуемого безопасного уровня. [1], [2], [3], [5]. В основу этих методик положен сложный расчет температурных полей на основе уравнения Лапласа, что не позволяет использовать их в производственных условиях. В существующих методиках длина впадин не рассчитывается по температурному критерию, а выбирается, исходя из условий предотвращения размерного износа круга. Например, в работе [4] рассчитывается длина выступа l_1 , а длина впадины l_2 выбирается равной $l_2 = (0,3-0,5) l_1$ из соображения износостойкости кругов.

2. Цель исследования. Целью настоящей работы является разработка методики расчета длин выступов и впадин на прерывистом круге с учетом температурного критерия.

3. Основной материал исследования. Рассмотрим случай, когда к концу полубесконечного адиабатического стержня приложен тепловой источник постоянной интенсивности q . В этом случае дифференциальное уравнение теплопроводности можно записать в виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

При начальном и граничных условиях первого рода:

$$\begin{aligned} \theta_{(x,\tau)}|_{\tau=0} &= 0 \\ -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial \tau} |_{x=0} &= q = const \\ \frac{\partial \theta_{(x,\tau)}}{\partial x} |_{x=\infty} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Решение данного дифференциального уравнения имеет вид:

$$\theta = 2 \cdot q \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot ierfc \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) \quad (3)$$

где θ_0 - начальная температура детали, равная температуре среды, °C;

θ_u - температура теплового источника, °C;

c - теплоемкость обрабатываемого материала, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

ρ_M - плотность обрабатываемого материала, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

λ - коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$;

q - плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_M}$ - коэффициент температуропроводности;

τ - время действия теплового источника, с;

x - координата, отсчитываемая от торца адиабатического стержня в направлении его оси.

При $x = 0$ $ierfc \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) = 0,5642$.

В этом случае решение дифференциального уравнения (3.1) будет иметь вид:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \quad (4)$$

Предположим, что за время контакта режущего выступа шлифовального круга со стержнем τ_1 , последний «получил» количество Q_1 , а за время прохождения впадины τ_2 «потерял» (в результате теплообмена с окружающей средой) количество тепла Q_2 . Тепловой баланс опишется:

$$Q_1 - Q_2 = Q_3 \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} Q_1 &= q_1 \cdot S \cdot \tau_1 \\ Q_2 &= q_2 \cdot S \cdot \tau_2 \\ Q_3 &= q_3 \cdot S \cdot \tau_3 \end{aligned}$$

Q_3 – общее количество тепла, которое «получил» стержень за время прохождения выступа и впадины прерывистого шлифовального круга;

q_2 – плотность теплового потока при прохождении впадины круга, Вт/м²;

q_1 – плотность теплового потока при прохождении режущего выступа шлифовального круга, Вт/м²;

τ_3 – условное время, определяющее температуру после прохождения впадины круга, с;

S – площадь торца адиабатического стержня, м².

С учетом условия теплообмена стержня с окружающей средой (условия Ньютона–Рихмана) плотность теплового потока пропорциональна разности температур на торце стержня и окружающей среды (равной нулю).

$$q_2 = \alpha \left[\left(\frac{\theta_n - \theta_k}{2} \right) - 0 \right], \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot C}$;

θ_n, θ_k – соответственно температура торца стержня после прохождения выступа и впадины круга, °С;

$\left(\frac{\theta_n - \theta_k}{2} \right)$ – средняя температура на торце стержня, °С.

$$\theta_n = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_1}{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \quad (7)$$

$$\theta_k = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_3}{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \quad (8)$$

После подстановки (7), (8) и (6) в (5) имеем:

$$(\tau_1 - \tau_3) = \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \cdot (\sqrt{\tau_1} + \sqrt{\tau_3}) \cdot \tau_2 \quad (9)$$

Отсюда искомое время τ_3 определится:

$$\tau_3 = \left(\sqrt{\tau_1} - \alpha \cdot \sqrt{\tau_2} \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \right)^2 \quad (10)$$

Температура после прохождения впадины круга равна:

$$\theta_k = q_1 \cdot \left[\sqrt{\frac{2 \cdot \tau_1}{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} - \frac{\alpha \cdot \tau_2}{c \cdot \rho_M \cdot \lambda} \right] \quad (11)$$

Из зависимости (11) следует, что температура резания после прохождения впадины меньше, чем после прохождения выступа шлифовального круга. Увеличение параметров α и τ_2 снижает температуру θ_k . Очевидно, применение прерывистого круга создает условия существенного снижения θ_k .

С учетом $\tau_1 = \frac{L_1}{V_{kp}}$; $\tau_2 = \frac{L_2}{V_{kp}}$; (где L_1, L_2 – соответственно длина выступа и впадина круга), $k_{np} = \frac{L_2}{L_1}$, зависимость (11) выразится:

$$\theta_k = q_1 \cdot \left[\sqrt{\frac{2 \cdot L_1}{c \cdot \rho_M \cdot \lambda \cdot V_{kp}}} - \frac{\alpha \cdot L_1}{c \cdot \rho_M \cdot \lambda \cdot V_{kp}} \right] \quad (12)$$

Находится первая частная производная от функции

$$T'_k = q_1 \left[\sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{kp}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{l'_1}} - \frac{\alpha \cdot k_{np}}{c \cdot \rho_M \cdot \lambda \cdot V_{kp}} \right] = 0 \quad (13)$$

После приведения этой формулы к общему знаменателю, получится дробь. Дробь тогда равна нулю, когда ее числитель равен нулю. Приравняем числитель этой дроби к нулю:

$$\sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{kp}} - \alpha \cdot k_{np} \cdot \sqrt{2l'_1} = 0$$

Из полученного выражения выражаем:

$$\sqrt{l'_1} = \frac{\sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{kp}}}{\sqrt{2 \alpha \cdot k_{np}}}; \quad = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{kp}}{2 \alpha^2 \cdot k_{np}^2} \quad (14)$$

Находится вторая производная от функции T_k по l_1 . Составляется неравенство для определения выпуклости функции.

$$(T_k)''_{l'_1} = q_1 \cdot \frac{-1}{2 \cdot \sqrt{2 c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{kp}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(l'_1)^3}} < 0 \quad (15)$$

Вторая производная функции θ_k отрицательна. Следовательно, имеет место максимум функции θ_k (рис. 1). Из этого следует, что существует значение L_1 , при достижении которого $\theta_k = 0$ т.е. температура резания принимает наименьшее значение.

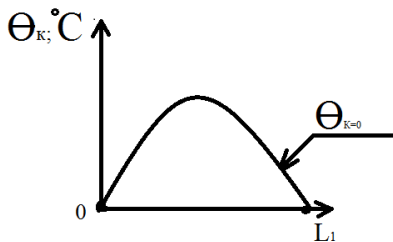


Рисунок 1 – Общий вид зависимости температуры шлифования от длины режущего выступа прерывистого круга при постоянном значении коэффициента прерывистости $k_{np} = L_2/L_1$

Определим количество выступов прерывистого шлифовального круга n , необходимое для выполнения условия $\theta_k = 0$

$$n = \frac{\pi \cdot D_{kp}}{(L_1 + L_2)} \quad (16)$$

где D_{kp} - диаметр шлифовального круга.

С учетом зависимости (14) количество режущих выступов n определится:

$$n = \left[\frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot v_{kp}}{2 \cdot \alpha^2 \cdot k_{np}^2} \right] \quad (17)$$

Рассмотрим плотность теплового потока q_1 при прерывистом шлифовании.

$$q_1 = \frac{P_z \cdot v_{kp}}{F} = \frac{\sigma \cdot Q \cdot (1 + 0,5 \cdot k_{np})}{v_{kp}} \cdot \frac{v_{kp}}{F} = \frac{\sigma \cdot Q \cdot (1 + 0,5 \cdot k_{np})}{F} \quad (18)$$

где σ - условное напряжение резания, Н/м²;

F – площадь контакта шлифовального круга с деталью, м²;

Q – производительность обработки, м³/с.

Наличие множителя $(1 + 0,5 \cdot k_{np})$ означает то, что фактический сьем материала режущим выступом прерывистого шлифовального круга увеличивается на $(1 + 0,5 \cdot k_{np})$ за счет «неснятого материала» при прохождении впадины круга.

Анализируя зависимость (12) с учетом (18), нетрудно видеть, что θ_k с увеличением k_{np} проходит точку экстремума. Для определения наличия максимума (минимума) функции θ_k возьмем вторую производную от θ_k по параметру k_{np} :

$$(\theta_k)''_{k_{np}} = - \frac{\sigma \cdot Q}{F} \cdot \frac{2 \cdot L_1}{c \cdot \rho_m \cdot \lambda \cdot v_{kp}} \quad (19)$$

Как видно, вторая производная функции θ_k отрицательна, т.е функция θ_k с изменением k_{np} проходит точку максимума (рис. 2).

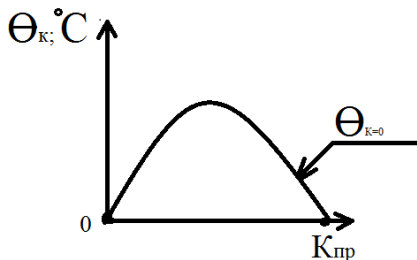


Рисунок 2 – Общий вид зависимости температуры шлифования от коэффициента прерывистости $k_{np} = L_2/L_1$, при постоянной длине режущего выступа L_1 прерывистого круга.

Из этого следует, что существует значение k_{np} , при котором температура резания принимает наименьшее значение $\theta_k = 0$.

Как установлено выше, для реализации данного условия коэффициент k_{np} и геометрические параметры прерывистого шлифовального круга L_1 и L_2 необходимо устанавливать по зависимостям (14) и (17). В работе [4] приводились экспериментальные данные, подтверждающие экстремальный характер температуры при прерывистом шлифовании в зависимости от длины впадины l_2 (рис. 3).

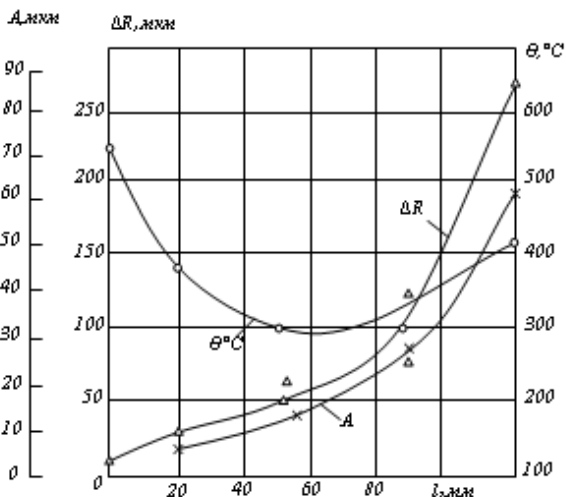


Рисунок 3 – Зависимость температуры шлифования, радиального износа круга, амплитуды колебаний шпинделя от протяженности впадины прерывистого круга

Из этого рисунка видно, что рост температуры при шлифовании кругами с протяжностью впадин $l_2=70$ мм и более обусловлен резким увеличением глубины микрорезания и работы трения связки. Однако температура в зоне шлифования даже для случаев, когда $l_1=12.5$ мм и $l_2=118.5$ мм, остается ниже по сравнению с обычным шлифованием на 25-30%. [4].

Список использованных источников: 1. *Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин* «Оптимизация геометрических параметров прерывистых кругов» // Вестник машиностроения: Нац. Технический университет Украины «Киевский политехнический институт», 2012, Вып. 65-С.9-11. 2. *Ф.В. Новиков* К вопросу о сущности прерывистого шлифования / *Ф.В. Новиков, А.А. Якимов* // Сборник научных трудов НТУ <<ХПИ>>. – Харьков, Вып. 1(4). 2001. 3. *А.В. Якимов, Н.А. Ярмонов, Ю.А. Напарын* Методика расчета кругов с прерывистой рабочей поверхностью // Вестник машиностроения. – 1973. - №12 – С.38-41. 4. *А.В. Якимов* Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176с. 5. *В.Н. Кудашкин, Е.В. Грисенко, Н.А. Ярмонов, А.В. Якимов* // Исследование влияния конструкции абразивных кругов и режима обработки на температуру шлифования // Прогрессивные методы шлифования: (Кр. тез. докл. к семинару). – Челябинск, 1975. – С.19-24.

Bibliography (transliterated): 1. *N.V. Lishhenko, V.P. Larshin* «Optimizacija geometricheskijh parametrov preryvistykh krugov» // Vestnik mashinostroenija: Nac. Tehnicheskij universitet Ukrainy «Kievskij politehnicheskij institut», 2012, Vyp. 65-S.9-11. 2. *F.V. Novikov* K voprosu o sushhnosti preryvistogo shlifovanija / *F.V. Novikov, A.A. Jakimov* // Sbornik nauchnyh trudov NTU <<HPI>>. – Har'kov, Vyp. 1(4). 2001. 3. *A.V. Jakimov, N.A. Jarmonov, Ju.A. Napar'in* Metodika rascheta krugov s preryvistoj rabochej poverhnost'ju // Vestnik mashinostroenija. – 1973. - №12 – S.38-41. 4. *A.V. Jakimov* Optimizacija processa shlifovanija. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 176s. 5. *V.N. Kudashkin, E.V. Grisenko, N.A. Jarmonov, A.V. Jakimov* // Issledovanie vlijanija konstrukcii abrazivnyh krugov i rezhima obrabotki na temperaturu shlifovanija // Progressivnye metody shlifovanija: (Kr. tez. dokl. k seminaru). – Cheljabinsk, 1975. – S.19-24.

Поступила в редколлегию 25.06.2014