

## РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ

*Витебский государственный технологический университет  
Витебск, Беларусь*

Задачей из аспектов предварительной оптимизации процесса шлифования является выбор шлифовального круга, важнейшими свойствами которого являются режущая способность и тепловая активность. Рабочими характеристиками обычного (многопроходного или многооборотного) шлифования, которыми пользуются для оптимизации показателей рабочего цикла [1], являются коэффициент режущей способности  $K_p$ , показатели теплового ограничения производительности (глубина бесприжогового шлифования  $a_x$  и коэффициент тепловой активности  $b$ ) и параметры модели затупления шлифовального круга. Однако показатель  $K_p$  не пригоден для глубинного шлифования, так как в этом случае сила  $P_y$  не характеризует уровень полного давления в зоне шлифования (глубины внедрения абразивных зерен). Необходимо также учесть скорость шлифования. Поэтому в качестве новой характеристики режущих свойств шлифовального круга при глубинном и обычном шлифовании предлагается принять отношение объема материала  $V_{уд}$ , удаленного единицей площади рабочей поверхности шлифовального круга, к среднему радиальному давлению  $p_c$  в зоне шлифования.

Рассмотрим случай вышлифовки канавки кругом прямого профиля.

За время  $\tau$  при глубинном шлифовании канавки глубиной  $a$  и шириной  $B$  со скоростью продольной подачи  $S_{пр}$  удаляется объем  $V = a \cdot B \cdot S_{пр} \cdot \tau$ . За это же время в работе принимает участие площадь шлифовального круга  $F = 0,001 \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau$ , где  $V_{кр}$  рабочая скорость круга. Тогда отношение ( $\text{мм}^3/\text{мм}^2$ ):

$$V_{уд} = 10^3 \cdot a \cdot S_{пр} / V_{кр}, \quad (1)$$

Среднее давление в зоне шлифования (контакта шлифовального круга с заготовкой) определяется выражением ( $\text{кН}/\text{мм}^2$ ):

$$p_c = P_r / (B \cdot L), \quad (2)$$

где  $P_r$  – радиальная сила шлифования;  $L$  – длина дуги контакта.

В предположении, что давление  $p$  в зоне шлифования пропорционально текущему значению угла  $\psi$  (рис. 1), найдено выражение для вычисления значения угла  $\mu$  отклонения радиальной силы от вертикальной оси.

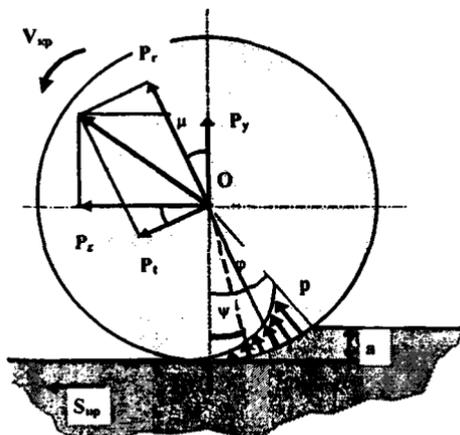


Рис. 1. Схема плоского глубинного шлифования

получена модель для вычисления обобщенного коэффициента режущей способности  $K_{po}$  в случае плоского глубинного шлифования кругом формы ПП ( $\text{мм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{кН})$ ):

$$K_{po} = 10^3 \cdot \frac{a \cdot S_{шп} \cdot B \cdot D}{V_{шп}} \cdot \frac{\text{arctg} \sqrt{a/(D-a)}}{P_y \cdot \cos \mu + P_x \cdot \sin \mu}, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр шлифовального круга,  $P_y$  и  $P_x$  – проекции силы шлифования на соответствующие оси.

Для случая многопроходного шлифования с малыми значениями глубины, когда угол  $\mu \rightarrow 0$ , согласно модели (4) и определению коэффициента режущей способности  $K_p$ , можно записать:

$$K_{po} = 10^3 \cdot K_p \cdot \sqrt{a \cdot D} / V_{шп}. \quad (5)$$

Значение  $K_{po}$  для разных сочетаний характеристик шлифовального круга и обрабатываемого материала можно экспериментально определять с помощью приспособления, схема которого показана на рис. 2. В том случае, когда образец шлифуется в течение времени  $\tau$ , значение  $K_{po}$  определяется по зависимости:

$$K_{po} = 10^3 \cdot \frac{B \cdot h \cdot L^2}{V_{шп} \cdot P_r \cdot \tau}, \quad (6)$$

где  $h$  – линейный сьем материала образца за время  $\tau$ ,  $P_r$  – сила прижима образца к шлифовальному кругу, которую обеспечивают грузы 4.

$$\text{tg} \mu = \lim_{i \rightarrow N} \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot \sin[(2i-1) \cdot \varphi / 2N]}{\sum_{i=1}^N i \cdot \cos[(2i-1) \cdot \varphi / 2N]},$$

где  $N$  – число дискрет, на которые разбит угол контакта  $\varphi$ .

Численным моделированием установлено, что значение  $\mu$  с высокой степенью точности можно вычислять по следующей простой модели

$$\mu = 0,98 \cdot \sqrt{2 \cdot a / D}. \quad (3)$$

На основании схемы сил, показанной на рис. 1, и с учетом моделей (1) и (2),

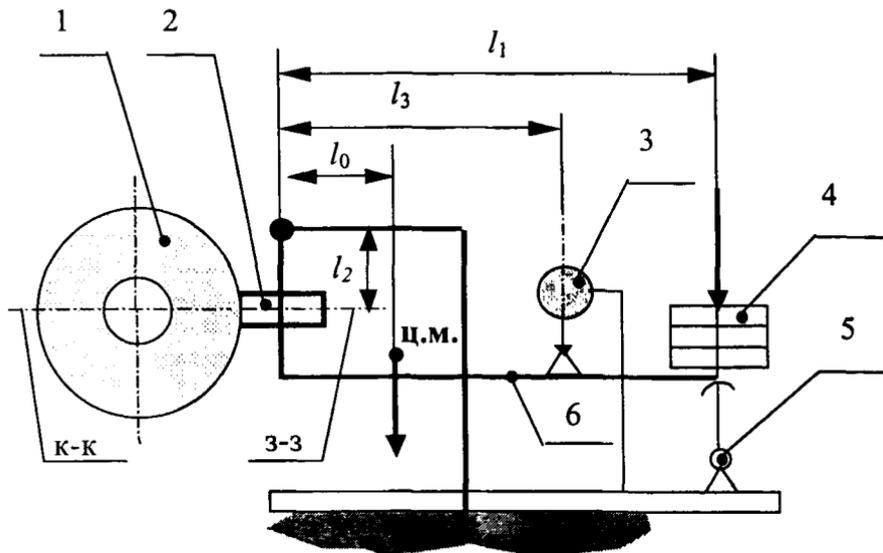


Рис. 2. Схема установки для определения  $K_{po}$  и  $K_{тк}$ .

1 – испытуемый шлифовальный круг; 2 – шлифуемый образец материала; 3 – индикатор съема; 4 – грузы; 5 – откидной упор; 6 – рычаг;  $l_1, l_2, l_3, l_0$  – плечи, используемые в расчетах

Приспособление, схема которого показана на рис. 2, можно использовать и для определения комплексного показателя  $K_{тк}$  (условного коэффициента), позволяющего выбирать круг по его тепловой активности. Для этого следует применять образец, который представляет собой полусинтетическую термопару, что позволяет непрерывно измерять температуру шлифуемой поверхности образца  $T_0$ .

Шлифуемый образец (в виде стержня прямоугольного сечения) представляем как полубесконечный, для которого определено граничное условие второго рода. В работе [2] получено следующее уравнение для вычисления температуры  $T_{II}$  на торце полубесконечного стержня, где действует источник тепла с плотностью  $q_0$ :

$$T_{II} = \frac{2 \cdot q_0}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{\omega_0 \cdot \tau}{\pi}}, \quad (7)$$

где  $\lambda_0$  – теплопроводность материала образца (заготовки), Вт/м·град;  $\omega_0$  – коэффициент температуропроводности образца, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – время действия источника, с.

Так как ширина стержня много меньше диаметра круга, то температурное поле круга можно описать уравнением теплопроводности для движущегося со скоростью  $V_{ш}$  теплового источника, для которого применимо граничное условие второго рода

( $q_n = \text{const}$ ). При большой скорости источника, температура впереди источника и на его передней границе, равна первоначальной температуре тела ( $T_0=0$ ). Внутри источника она быстро повышается и достигает своего максимума на его задней кромке. Для этого максимума выполняется [3]:

$$T_k = \frac{2 \cdot q_k \cdot \sqrt{L}}{\sqrt{\pi \cdot \lambda_k \cdot c_k \cdot \gamma_k \cdot V_{кр}}}, \quad (8)$$

где  $L$  – длина дуги контакта (ширина стержня), м;  $\lambda_k$  – теплопроводность круга,  $c_k$  – теплоёмкость круга, Дж/кг·град;  $\gamma_k$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

В общем случае уравнение теплового баланса записывается следующим образом:

$$Q_{y,кр} + Q_{y,дет} + Q_{y,струж} + Q_{y,сож} = Q_y, \quad (9)$$

где  $Q_{y,кр}$ ,  $Q_{y,дет}$ ,  $Q_{y,струж}$ ,  $Q_{y,сож}$  – удельное количество теплоты (или тепловой поток), уходящее соответственно круг, деталь, стружку и СОЖ;  $Q_y$  – общее количество теплоты, выделившиеся в процессе резания, Дж/с.

Из (9) исключаем  $Q_{y,сож}$ , так как доля теплоты, поступающей в СОЖ (или (и) в атмосферу) попадает в нее не непосредственно из зоны контакта, а с поверхности нагретого металла уже после того, как шлифовальный круг прошел это место.

Тогда перепишем (9) как:

$$Q_{y,кр} + Q_{y,дет} = Q_y - Q_{y,струж}. \quad (10)$$

Здесь  $Q_y = q \cdot S$ , где  $q$  – плотность теплового потока,  $S$  – площадь, через которую передается теплота, м<sup>2</sup>.  $Q_{y,струж} = c_d \cdot m_c \cdot T_c$ , где  $m_c$  – масса стружки, снимаемой за единицу времени, кг/с,  $T_c$  – температура стружки, °С. Уравнение (10) примет вид:

$$q_d \cdot S_d + q_k \cdot S_k = N_{эфф} - 10^{-9} \cdot c_d \cdot \gamma_d \cdot h \cdot S_d \cdot T_c / \tau, \quad (11)$$

где  $q_d$ ,  $q_k$  – тепловые потоки, определяемые из (7) и (8), Дж/с·м<sup>2</sup>;  $N_{эфф}$  – эффективная мощность шлифования, Вт;  $S_d = B \cdot L$  – площадь, через которую теплота переходит в деталь ( $B$  – ширина контакта,  $L$  – длина дуги контакта);  $S_k$  – эффективная площадь контакта абразивных зерен с деталью,  $h$  – величина съема металла за время  $\tau$ , мм.

В первом приближении можно считать, что  $T_c$  и  $T_k$  не зависят от режимов шлифования, а определяются температурой плавления шлифуемого материала  $T_{пл}$ . Тогда из [3]  $T_n = T_k = 0,85 \cdot T_{пл}$ .

В итоге получим выражение для некоторого показателя, отражающего совокупность теплофизических характеристик шлифовального круга:

$$K_{тк} = A \cdot \left( \frac{N_{эфф} - Q_c}{B \cdot L} - q_0 \right), \quad (12)$$

где  $K_{тк}$  – коэффициент теплоотвода, характеризующий интенсивность отвода теплоты в шлифовальный круг и являющийся комплексной теплофизической характеристикой круга,

$$K_{тк} = \delta \cdot \sqrt{(\lambda \cdot c \cdot \gamma)_к}, \quad \delta = S_к / S_d,$$

$$A = \frac{2,35}{T_{пл}} \cdot \sqrt{\frac{L}{\pi \cdot V_{кр}}}, \quad q_0 = \frac{T_{пл}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot (\lambda \cdot c \cdot \gamma)_д}{\tau}},$$

$$Q_c = 0,85 \times 10^{-12} \cdot T_{пл} \cdot c_d \cdot \gamma_d \cdot K_{ро} \cdot V_{кр} \cdot P_r / L.$$

Поскольку  $S_x$  существенно зависит от радиальной силы  $P_r$ , то коэффициент теплоотвода шлифовального круга следует характеризовать параметрами модели  $K_{тк} = f(P_r)$ . Если значение  $K_{ро}$  определено заранее, то при реализации эксперимента по определению  $K_{тк}$  следует записывать только зависимость температуры поверхности от времени при различных значениях радиальной силы. Время каждого опыта составляет 10...20 с. Необходимые для расчета  $K_{тк}$  значения теплофизических показателей материала образца приведены в [2].

Таким образом, для оценки рабочих свойств шлифовального круга предлагаются два новых показателя: обобщенный коэффициент режущей способности и коэффициент теплоотвода, а также методика их определения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Махаринский Е. И. Технологические основы управления процессом шлифования. – М.: СНИО СССР, 1990. – 52 с.
2. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1078. – 166 с.
3. Яцерицын П. И., Цокур А.К., Еременко М. Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. – Мн.: Наука и техника, 1973. – 184 с.

УДК 621.9.048.6

Н.Т. Минченя, В.Г. Куптель

### ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ВИБРАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия  
Минск, Беларусь*

Повышение эффективности процесса резания нержавеющей, жаропрочных сплавов и других труднообрабатываемых материалов требует изыскания новых методов и