

Исходя из баланса упругих перемещений в технологической системе, теоретически определены основные соотношения параметров механики внутреннего алмазного шлифования. Обоснованы условия повышения производительности обработки при внутреннем шлифовании твердого сплава ВК15 алмазными кругами на металлической, керамической и органической связках. Установлено, что наибольшая сила резания, действующая на отдельное зерно, достигается при шлифовании алмазным кругом на металлической связке, а наименьшая – при шлифовании алмазным кругом на керамической связке. Металлическая связка обеспечивает наибольшую прочность удержания зерен, что предопределяет увеличенные значения силы резания, действующей на отдельное зерно, степени затупления зерна круга и соответственно наименьшую производительность обработки.

При внутреннем алмазном шлифовании, когда производится съём относительно небольших припусков, соизмеримых с величиной упругого перемещения элементов технологической системы, может иметь место существенное различие между фактической и номинальной производительностями обработки. Для того чтобы приблизить фактическую и номинальную производительности обработки, рассмотрим на первом этапе баланс упругих перемещений в технологической системе при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга.

Под действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  происходят упругие перемещения элементов технологической системы  $y$ . В общем виде

$$y = V'_{дем} \cdot \tau - \int \bar{V}'_{дем} \cdot d\tau, \quad (1)$$

где  $\tau$  - время обработки, с;  $V'_{дем}$  и  $\bar{V}'_{дем}$  - номинальная и фактическая скорости съема материала, м/с.

При работе круга в режиме самозатачивания процесс шлифования стабилизируется во времени и величина  $y$  принимает постоянное значение. Фактический съём материала, определяемый вторым слагаемым в зависимости (1), меньше номинального съема, устанавливаемого по лимбу станка и определяемого первым слагаемым.

При работе круга в режиме затупления величина  $y$  переменна во времени (непрерывно увеличивается). Это обусловлено более интенсивным увеличением первого слагаемого в (1).

При внутреннем шлифовании твердого сплава ВК15 алмазным кругом на керамической связке К1 производительность обработки  $Q$  первоначально уменьшается, затем стабилизируется во времени, рис. 1.

Исходя из зависимости (1), это связано с тем, что в начальный период времени первое слагаемое больше второго. Через 4 минуты работы круга разность первого и второго слагаемого принимает постоянное значение. Разность  $\Delta Q = Q_1 - Q_2$  соответственно при  $\tau_1 = 2$  мин. и  $\tau_2 = 4$  мин. определяет величину  $y$ . При поперечной подаче  $S_{нон} = 0,1$  мм/мин -  $\Delta Q = 60$  мм<sup>3</sup>/мин, при  $S_{нон} = 0,2$  мм/мин -  $\Delta Q = 65$  мм<sup>3</sup>/мин, при  $S_{нон} = 0,3$  мм/мин -  $\Delta Q = 150$  мм<sup>3</sup>/мин, т.е. с увеличением  $S_{нон}$  параметры  $\Delta Q$  и  $y$  увеличиваются.

Представим (1) в упрощенном виде с учетом  $V'_{дем} = V_{дем} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дем}} \right)}$  (где  $V_{дем}$  - скорость детали при внутреннем шлифовании, м/с;  $t$  - номинальная глубина шлифования, м;  $R_{кр}, R_{дем}$  - соответственно радиусы круга и детали, м):

$$y = V_{дем} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot \tau \cdot \left( \sqrt{t} - \sqrt{t_{\phi}} \right), \quad (2)$$

где  $t_{\phi}$  - фактическая глубина шлифования, м;  $\rho = \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дем}} \right)$ .

В работе [1] приведены зависимости для определения  $P_y$ :

$$P_y = \frac{\pi \cdot t g \gamma \cdot HV}{(1 - \eta)} \cdot \frac{B \cdot V_{дем} \cdot t}{V_{кр}}, \quad (3)$$

$$P_y = \frac{B \cdot m \cdot P_{y1}^{1.5}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3} \cdot \left( \frac{2 \cdot t}{\pi \cdot HV \cdot \rho} \right)^{0.5}. \quad (4)$$

где  $\bar{x}$  - зернистость круга, м;  $m$  - объемная концентрация зерен в круге;  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с;  $\gamma$  - половина угла при вершине конусообразного зерна;  $B$  - ширина шлифования, м;  $HV$  - твердость обрабатываемого материала, н/м<sup>2</sup>;  $\eta$  - безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерна круга (изменяется в пределах 0...1);  $P_{y1}$  - радиальная составляющая силы резания, действующей на отдельное зерно круга, Н.

Подставим (2) в (4), рассматривая параметр  $t$  как фактическую глубину шлифования  $t_{\phi}$ , а  $P_{y1} = c \cdot y$ , тогда

$$\frac{1,42 \cdot V_{дет} \cdot \rho \cdot \tau}{c} \cdot \left( \sqrt{\frac{t}{t_{\phi}}} - 1 \right) = \frac{m \cdot P_{y1}^{1,5} \cdot B}{630 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3} \cdot \left( \frac{2}{\pi \cdot HV} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где  $c$  - приведенная жесткость системы, Н/м.

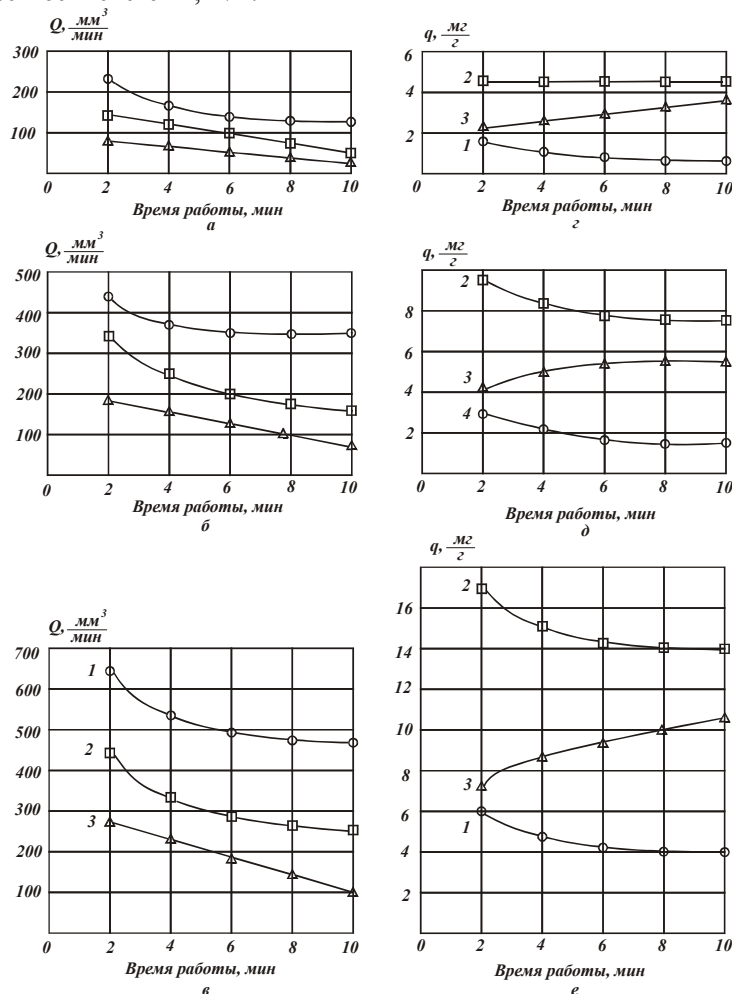


Рис.1. Зависимость производительности обработки  $Q$  и удельного расхода алмаза  $q$   
 а, г -  $S_{non} = 0,1$  мм/мин; б, д -  $S_{non} = 0,2$  мм/мин; в, е -  $S_{non} = 0,3$  мм/мин;  
 1 - алмазный круг АС6 160/125 К1 - 100%; 2 - АС6 160/125 Б1 - 100%; 3 - АС6 160/125 М2-01 - 100%;  
 $V_{кр} = 23$  м/с;  $V_{дет} = 60$  м/мин;  $S_{np} = 3$  м/мин.

Сила  $P_{y1}$  при фиксированном значении  $\tau$  зависит от соотношения  $t/t_{\phi}$ . Сила  $P_{y1}$  тем больше, чем больше  $t/t_{\phi}$ . Фактическая производительность обработки  $Q_{\phi}$  определяется параметром  $t_{\phi}$ :

$$Q_{\phi} = 2 \cdot R_{дет} \cdot S_{np} \cdot t_{\phi}, \quad (6)$$

где  $S_{np}$  - скорость продольной подачи, м/с.

Исходя из рис.1, можно принять, что при  $\tau = 2$  мин. фактическое и номинальное значения  $t_{\phi}$  и  $t$  равны. Тогда при  $\tau = 2$  мин. отношение  $t/t_{\phi} = 1$ . При  $\tau = 4$  мин отношение  $t/t_{\phi}$  определяется отношением производительности обработки при  $\tau = 2$  мин. и  $\tau = 4$  мин. и равно 1,39. За две минуты шлифования отношение  $t/t_{\phi}$  увеличилось в 1,39 раз. Согласно зависимости (5), это ведет к увеличению силы  $P_{y1}$ .

Определим характер изменения безразмерного коэффициента  $\eta$  в соответствии с зависимостью (3), рассматривая параметр  $t$  как  $t_\phi$ . С учетом (2) зависимость (3) примет вид

$$\frac{1,42 \cdot \rho \cdot \tau}{c \cdot \sqrt{t_\phi}} \cdot \left( \sqrt{\frac{t}{t_\phi}} - 1 \right) = \frac{\pi \cdot t g \gamma \cdot HV}{(1-\eta)} \cdot \frac{S_{np}}{V_{кр}}. \quad (7)$$

С увеличением  $\tau$  параметр  $t_\phi$  уменьшается. Это ведет к увеличению  $\eta$ , что свидетельствует об увеличении степени затупления зерен.

Согласно зависимостям (3) и (4), при  $\tau > 4$  мин. (рис.1) параметры  $P_{y1}$  и  $\eta$  с течением времени обработки остаются постоянными в связи со стабилизацией параметров  $\Delta Q$  и  $y$ . Технологическая система принимает равновесное состояние в результате работы круга в режиме самозатачивания.

Принимая за начало отсчета номинальной глубины шлифования  $t$  значение, соответствующее  $\tau = 2$  мин., определим параметры  $P_{y1}$  и  $\eta$  для  $\tau = 10$  мин. Для  $S_{non} = 0,1$  мм/мин. значения  $Q$  и  $Q_\phi$  соответственно равны: 250 и 180 мм<sup>3</sup>/мин, а  $t/t_\phi = Q/Q_\phi = 1,39$ . Для  $S_{non} = 0,2$  мм/мин значения  $Q$  и  $Q_\phi$  равны: 450 и 370 мм<sup>3</sup>/мин;  $t/t_\phi = 1,2$ . Для  $S_{non} = 0,3$  мм/мин. значения  $Q$  и  $Q_\phi$  равны: 650 и 500 мм<sup>3</sup>/мин;  $t/t_\phi = 1,3$ .

С учетом зависимости (7) величина  $\frac{1}{\sqrt{t}} \cdot \left( \sqrt{\frac{t}{t_\phi}} - 1 \right)$  для  $S_{non} = 0,1$  мм/мин. равна 0,013 (рассматривая вместо  $t_\phi$  параметр  $Q_\phi$ ). Для  $S_{non} = 0,2$  мм /мин – 0,005; для  $S_{non} = 0,3$  мм /мин – 0,006. Следовательно, с увеличением  $S_{non}$  наблюдается тенденция к увеличению величины  $(1-\eta)$  и уменьшению  $\eta$ . Это указывает на уменьшение степени затупления зерна до момента его выпадения из связки, что согласуется с экспериментальными данными.

При внутреннем шлифовании алмазным кругом на органической связке Б1 производительность обработки во времени непрерывно уменьшается (рис.1) за счет работы круга в режиме затупления. Исходя из зависимости (1), это ведет к увеличению величины  $\eta$ . а исходя из зависимости (5), - к увеличению силы  $P_{y1}$ , действующей на зерно круга. С течением времени обработки параметр  $t_\phi$  уменьшается. Следовательно, величина  $\frac{1}{\sqrt{t}} \cdot \left( \sqrt{\frac{t}{t_\phi}} - 1 \right)$  и безразмерный параметр  $\eta$  в соответствии с зависимостью (7), увеличивается. Этим обусловлено увеличение силы  $P_{y1}$ , величины упругого перемещения  $\eta$  и уменьшение производительности обработки.

Данная закономерность наблюдается для всех значений  $S_{non}$ . Разность  $\Delta Q$  за 8 минут шлифования для  $S_{non} = 0,1$  мм/мин. равна 80 мм<sup>3</sup>/мин., для  $S_{non} = 0,2$  мм/мин.-170 мм<sup>3</sup>/мин., для  $S_{non} = 0,3$  мм/мин. - 200 мм<sup>3</sup>/мин., т.е. с увеличением  $S_{non}$  разность  $\Delta Q$  и соответственно  $y$  увеличиваются.

Для  $S_{non} = 0,1$  мм /мин. значения  $Q$  и  $Q_\phi$  соответственно равны 150 и 70 мм<sup>3</sup>/мин., для  $S_{non} = 0,2$  мм /мин. - 340 и 180 мм<sup>3</sup>/мин., для  $S_{non} = 0,3$  мм /мин., - 470 и 260 мм<sup>3</sup>/мин. Тогда для  $S_{non} = 0,1$  мм/мин. отношение  $t/t_\phi = 2,14$ , для  $S_{non} = 0,2$  мм/мин. -  $t/t_\phi = 1,88$ , для  $S_{non} = 0,3$  мм/мин. -  $t/t_\phi = 1,8$ . Следовательно, с увеличением  $S_{non}$  в результате уменьшения соотношения  $t/t_\phi$  сила  $P_{y1}$ , согласно зависимости (5), уменьшается.

Величина  $\frac{1}{\sqrt{t}} \cdot \left( \sqrt{\frac{t}{t_\phi}} - 1 \right) \sim \frac{1}{\sqrt{Q}} \cdot \left( \sqrt{\frac{Q}{Q_\phi}} - 1 \right)$  для  $S_{non} = 0,1$  мм/мин. равна 0,055, для  $S_{non} = 0,2$  мм/мин. - 0,026, для  $S_{non} = 0,3$  мм/мин. – 0,02. Исходя из зависимости (7), это ведет к уменьшению  $\eta$ , т.е. рост  $Q_\phi$  с увеличением  $S_{non}$  происходит вследствие уменьшения  $\eta$ .

Сравним значения  $P_{y1}$  и  $\eta$  для различных связок алмазных кругов ( $S_{non} = 0,3$  мм/мин.,  $\tau = 10$  мин). Для алмазного круга на керамической связке значения  $Q$  и  $Q_\phi$  соответственно равны: 650 и 500 мм<sup>3</sup>/мин.;  $t/t_\phi = 1,3$ ;  $\frac{1}{\sqrt{Q}} \cdot \left( \sqrt{\frac{Q}{Q_\phi}} - 1 \right) = 0,006$ . Для алмазного круга на органической связке значения  $Q$  и  $Q_\phi$  равны: 470 и 260

мм<sup>3</sup>/мин.;  $t/t_\phi = 1,8$ ;  $\frac{1}{\sqrt{Q}} \cdot \left( \sqrt{\frac{Q}{Q_\phi}} - 1 \right) = 0,02$ . Для алмазного круга на металлической связке значения  $Q$  и  $Q_\phi$  равны: 290 и 120 мм<sup>3</sup>/мин.;  $t/t_\phi = 2,4$ ;  $\frac{1}{\sqrt{Q}} \cdot \left( \sqrt{\frac{Q}{Q_\phi}} - 1 \right) = 0,05$ .

Исходя из зависимости (5), с увеличением соотношения  $t/t_\phi$  сила увеличивается. Следовательно, наибольшая сила  $P_{y_1}$  достигается при шлифовании алмазным кругом на металлической связке, а наименьшая – при шлифовании алмазным кругом на керамической связке. Металлическая связка обеспечивает наибольшую прочность удержания зерен, чем и обусловлены увеличенные значения параметров  $P_{y_1}$  и  $\eta$  и низкая производительность обработки.

#### **Литература:**

1. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие/ А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450с.
2. Фадеев В.А. Алмазное шлифование твердых сплавов с введением в зону резания дополнительной энергии постоянного тока. – Автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Харьков, 1995. - 21с.