

УДК 621.923

Ф.В. Новиков, д-р техн. наук,  
А.В. Савчук, бакалавр,  
М.Н. Молочный, бакалавр

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ЗЕРЕН КРУГА

Ф.В. Новиков, А.В. Савчук, М.М. Молочный. Теоретичний аналіз параметрів алмазного шліфування із урахуванням зносу ріжучих зерен круга. Приведено розрахунок і аналіз параметрів силової напруженості процесу алмазного шліфування і продуктивності обробки із урахуванням зносу ріжучих зерен круга.

F.V. Novikov, A.V. Savchuk, M.M. Molochniy. The theoretical analysis of the parameters of diamond grinding with taking into account breakup of cutting corns of sphere. The calculation and analysis of parameters of strength pressure of the process of diamond grinding and productivity of handling with taking into account breakup of cutting corns of sphere.

Процессы алмазного шлифования находят все большее применение в машиностроении. Это требует их более глубокого изучения для выявления новых технологических возможностей в плане увеличения производительности обработки, снижения сил резания и улучшения качества обработки.

В работе [1] приведена аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания  $\sigma$ , рассматривая режущее зерно в форме сферы радиусом  $R$

$$\sigma = 3,2 \cdot \left( \frac{R}{a_z} \cdot HV \cdot \tau_{сдв}^2 \right)^{0,33}, \quad (1)$$

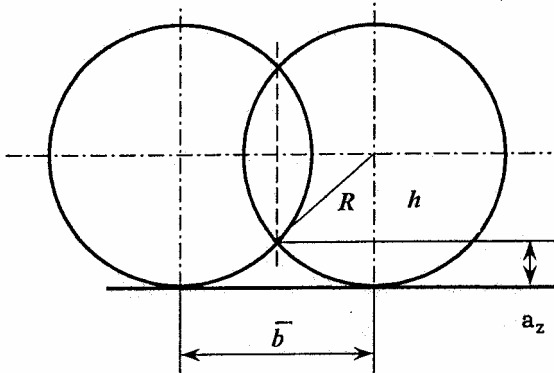
где  $a_z$  - толщина среза, м;

$HV, \tau_{сдв}$  - соответственно твердость (по Виккерсу) и предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, Н/м<sup>2</sup>.

В общем виде условное напряжение резания  $\sigma$  равно отношению тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  при шлифовании и площади поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами  $S_{мгн} = Q/V_{кр}$ , то есть

$$\sigma = \frac{P_z}{S_{мгн}} = P_z \cdot \frac{Q}{V_{кр}}, \quad (2)$$

где  $Q$  - производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  
 $V_{кр}$  - скорость круга, м/с.



Расчетная схема

Толщину среза  $a_z$ , равную высоте остаточных микронеровностей на обработанной поверхности  $R_{max}$  при шлифовании образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью  $V_{дет}$  определим из расчетной схемы, приведенной на рисунке

$$a_z = R - h = R - \sqrt{R^2 - \left( \frac{\bar{b}}{2} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $\bar{b}$  - расстояние между двумя соседними режущими зернами, представленными в виде сферы радиусом  $R$ , м.

Параметр  $\bar{b}$  определяется из условия  $\bar{b} \cdot n = B$ , (4)  
где  $B$  - ширина шлифования, м;

$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau \cdot \frac{a_z}{b_0}$  - количество работающих зерен;

$k$  - поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>

$\tau = \frac{a_z}{V'_{дет}}$  - время, за которое обрабатываемая деталь (или круг) переместится в ради-

альном направлении на величину  $a_z$ ; с;

$V'_{дет}$  - скорость движения обрабатываемой детали (или круга) в радиальном направлении, м/с.

Отношение  $a_z/b_0$  определяет долю работающих зерен из всех зерен, расположенных на рабочей поверхности круга, учитывая разновысотное выступание вершин зерен над уровнем связки круга;  $b_0$  - максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки.

Из зависимости (4) вытекает

$$\bar{b} = \frac{b_0}{k \cdot a_z^2} \cdot \frac{V'_{дет}}{V_{кр}} \quad (5)$$

Преобразуем зависимость (3)

$$\frac{a_z}{R} = \sqrt[5]{\frac{1}{8 \cdot R^6} \cdot \left( \frac{b_0 \cdot V'_{дет}}{k \cdot V_{кр}} \right)^2} \quad (6)$$

Подставим соотношение  $a_z/R$  в зависимость (1)

$$\sigma = 3,2 \cdot \sqrt[3]{HV \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot \sqrt[5]{8 \cdot R^6 \left( \frac{k \cdot V_{кр}}{b_0 \cdot V'_{дет}} \right)^2}} \quad (7)$$

Условное напряжение резания  $\sigma$  тем меньше, чем меньше параметры  $HV$ ,  $\tau_{сдв}$ ,  $R$ ,  $k$ ,  $V_{кр}$  и больше  $b_0$  и  $V'_{дет}$ . Из всех изменяющихся параметров процесса шлифования, определяющих режим резания и характеристики круга, наибольшее влияние на  $\sigma$  оказывает радиус режущей части зерна  $R$ . По мере затупления зерна радиус  $R$  увеличивается, что приводит к увеличению условного напряжения резания  $\sigma$ . Следовательно, уменьшить силовую напряженность процесса шлифования можно прежде всего уменьшением  $R$  за счет своевременного удаления с рабочей поверхности круга затупившихся зерен, применяя эффективные методы непрерывной и периодической правки или обеспечивая устойчивую работу круга в режиме самозатачивания.

Зависимость (7) представим в виде

$$\sigma = 3,2 \cdot \sqrt[3]{HV \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot \sqrt[5]{20 \cdot \left( \frac{R}{\bar{x}} \right)^6 \cdot \left( \frac{m \cdot V_{кр}}{V'_{дет}} \right)^2}} \quad (8)$$

где  $\bar{x}$ ,  $m$  - зернистость и концентрация круга.

Исходя из зависимости (8), наибольшее влияние на  $\sigma$  оказывают параметры  $R$  и  $\bar{x}$ . Следовательно, уменьшение  $R$  и увеличение  $\bar{x}$  является важнейшим условием снижения условного напряжения резания  $\sigma$ .

Получим аналитические зависимости для определения тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания

$$P_z = \sigma \cdot S_{мгн} = 3,2 \cdot \sqrt[3]{HV \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot \sqrt[5]{20 \cdot \left( \frac{R}{\bar{x}} \right)^6 \cdot \left( \frac{m \cdot V_{кр}}{V'_{дет}} \right)^2}} \cdot \frac{Q}{V'_{кр}} \quad (9)$$

$$P_y = \frac{P_z}{k_{рез}} = \frac{1,6}{\sigma_{сж}} \cdot \sqrt[3]{HV \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot \sqrt[5]{20 \cdot \left( \frac{R}{\bar{x}} \right)^6 \cdot \left( \frac{m \cdot V_{кр}}{V'_{дет}} \right)^2}} \cdot \frac{Q}{V'_{кр}} \quad (10)$$

где  $k_{рез} = \frac{2\sigma_{сж}}{\sigma}$  - коэффициент резания при шлифовании, равный отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания;

$\sigma_{сж}$  - предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, для сталей  $\sigma_{сж} \cong 2 \cdot \tau_{сдв}$

Как видим, радиальная составляющая силы резания  $P_y$  в большей степени зависит от условного напряжения резания  $\sigma$ , чем тангенциальная составляющая  $P_x$ . Следовательно, за счёт изменения соотношения  $\frac{R}{x}$  можно эффективно управлять силой  $P_y$ , что предполагает целесообразность применения упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием  $P_y$ . Производительность обработки  $Q$  в этом случае определится из зависимости (10)

$$Q = 0.63 \cdot \sigma_{сж} \cdot V_{кр} P_y \cdot \sqrt[3]{\left[ \frac{1}{H V} \cdot \sqrt[5]{0.05 \cdot \left(\frac{x}{R}\right)^6 \cdot \left(\frac{V'_{дет}}{m \cdot V_{кр}}\right)^2} \right]^2} \quad (11)$$

Рассматривая  $Q = F \cdot V'_{дет}$  (где  $F$  – площадь контакта обрабатываемого образца с кругом), из зависимости (11) следует, что производительность  $Q$  тем больше, чем больше параметры  $V_{кр}$ ,  $P_y$ ,  $\bar{x}$  и меньше  $R$  и  $m$ . С увеличением твердости  $HV$  и прочности  $\sigma_{сж}$  обрабатываемого материала производительность  $Q$  уменьшается.

Преобразуем зависимость (11)

$$Q = \left(0.63 \cdot \sigma_{сж} \cdot P_y\right)^{1.36} \cdot \left(\frac{1}{H V \cdot \tau_{сдв}^2}\right)^{0.91} \cdot \left[0.05 \cdot \left(\frac{x}{R}\right)^6 \cdot \frac{1}{F^2 \cdot m^2}\right]^{0.18} \cdot V_{кр} \quad (12)$$

Производительность  $Q$  линейно связана с параметрами  $V_{кр}$  и  $\frac{x}{R}$ . С увеличением  $P_y$  производительность  $Q$  увеличивается более чем по линейному закону. Однако при этом, в связи с увеличением нагрузки, действующее на зерно, и износа зерна, происходит увеличение радиуса его режущей части  $R$ , что может нивелировать увеличение  $Q$  и при определённых условиях привести к уменьшению производительности  $Q$ . Рассматривая  $\sigma_{сж} = 2 \cdot \tau_{сдв}$ , видим, что прочность обрабатываемого материала в меньшей степени влияет на производительность  $Q$ , чем твёрдость  $VH$ . Следовательно, чем выше твёрдость материала, тем хуже его обрабатываемость.

Таким образом, основным условием увеличения  $Q$  следует рассматривать уменьшение параметра  $R$ , за счёт своевременного удаления с рабочей поверхности затупившихся зёрен. Это позволит почти по линейному закону увеличить  $Q$ , увеличивая параметры  $V_{кр}$ ,  $P_y$ ,  $\bar{x}$ .

Определим тангенциальную  $P_{z1}$  и радиальную  $P_{y1}$  составляющие силы резания, действующей на отдельное зерно круга,

$$P_{z1} = S \cdot \sigma; \quad P_{y1} = \frac{P_{z1}}{k_{рез}} = \frac{S \cdot \sigma^2}{2 \cdot \sigma_{сж}} \quad (13)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения единичного среза (при  $a_z < R$  можно принять  $S = 0.5 \cdot \bar{b} \cdot a_z$  (рис.1).

Параметр  $\bar{b}$  определим из (3)

$$\bar{b} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot a_z \cdot R} \quad (14)$$

Тогда

$$S = \frac{1}{2} \cdot \bar{b} \cdot a_z = a_z \cdot \sqrt{2 \cdot a_z \cdot R} \quad (15)$$

Подставим (15) и (1) в зависимость (13) с учётом  $\sigma_{сж} = 2 \cdot \tau_{сдв}$

$$P_{z1} = 4.5 \cdot a_z^{1.17} \cdot R^{0.83} \cdot HV^{0.33} \cdot \tau_{сдв}^{0.66} \quad (16)$$

$$P_{y1} = 1.1 \cdot a_z^{1.17} \cdot R^{1.17} \cdot HV^{0.66} \cdot \tau_{сдв}^{0.33} \quad (17)$$

Составляющие силы резания  $P_{z1}$  и  $P_{y1}$  тем больше, чем больше все входящие в зависимость (16) и (17) параметры. Составляющая силы  $P_{z1}$ , в большей степени зависит от  $R$ .

Подставим в (16) и (17) зависимость (6)

$$P_{z1} = 4.5 \cdot \left[ \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{b_0 \cdot V'_{дет}}{k \cdot V_{кр}} \right)^2 \right]^{0.23} \cdot R^{0.6} \cdot HV^{0.33} \cdot \tau_{сдв}^{0.66}, \quad (18)$$

$$P_{y1} = 1.13 \cdot \left[ \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{b_0 \cdot V'_{дет}}{k \cdot V_{кр}} \right)^2 \right]^{0.17} \cdot R \cdot HV^{0.66} \cdot \tau_{сдв}^{0.33}, \quad (19)$$

или

$$P_{z1} = 4.5 \cdot \left[ \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{200 \cdot V'_{дет}}{m \cdot V_{кр}} \right)^2 \right]^{0.23} \cdot \bar{x}^{1.38} \cdot R^{0.6} \cdot HV^{0.33} \cdot \tau_{сдв}^{0.66}, \quad (20)$$

$$P_{y1} = 1.13 \cdot \left[ \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{200 \cdot V'_{дет}}{m \cdot V_{кр}} \right)^2 \right]^{0.17} \cdot \bar{x} \cdot R \cdot HV^{0.66} \cdot \tau_{сдв}^{0.33}. \quad (21)$$

Как видим, параметры режима шлифования  $V_{кр}$ ,  $V'_{дет}$  и концентрация круга  $m$  почти в одинаковой степени влияют на составляющие силы резания  $P_{z1}$  и  $P_{y1}$ . Зернистость круга  $\bar{x}$  в большей степени влияет на  $P_{z1}$ .

Учитывая то, что  $P_{z1} < P_{y1}$ , определим производительность обработки  $Q$  с учетом ограничения по предельной силе  $P_{y1}$ , обусловленной прочностью зерна на раздавливание. Для этого разрешим (21) относительно  $V'_{дет} = \frac{Q}{F}$

$$Q = 0.014 \cdot m \cdot F \cdot V_{кр} \cdot \left( \frac{P_{y1}}{1.13 \cdot \bar{x} \cdot R \cdot HV^{0.66} \cdot \tau_{сдв}^{0.33}} \right)^3. \quad (22)$$

Производительность обработки  $Q$  тем больше, чем больше параметры  $m$ ,  $F$ ,  $V_{кр}$ ,  $P_{y1}$ , и меньше  $\bar{x}$ ,  $R$ ,  $HV$ ,  $\tau_{сдв}$ . Предельное значение  $P_{y1}$  для зерен из синтетических сверхтвердых материалов приблизительно пропорционально зернистости круга  $\bar{x}$ , то есть  $P_{y1} = \alpha \cdot \bar{x}$ , тогда зависимость (22) примет вид

$$Q = 0.014 \cdot m \cdot F \cdot V_{кр} \cdot \left( \frac{\alpha}{1.13 \cdot R \cdot HV^{0.66} \cdot \tau_{сдв}^{0.33}} \right)^3. \quad (23)$$

Коэффициент  $\alpha$ , по сути, определяет марку алмаза. Чем прочнее алмаз, тем больше  $\alpha$  и производительность  $Q$ . Зернистость круга  $\bar{x}$  в зависимости (23) не входит. Основной эффект увеличения  $Q$  обусловлен уменьшением радиуса режущей части зерна  $R$ .

#### 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.
2. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Алмазная обработка. Учеб. пособие. — К.:ІЗМН, 1996.