

И.А. РЯБЕНКОВ, канд. техн. наук, ГП ХМЗ “ФЭД”, Харьков;
Ф.В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРЕНИЯ СВЯЗКИ КРУГА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

В работе получены аналитические зависимости для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания на основе отдельного учета энергий “чистого” резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Теоретически установлено, что с течением времени обработки в связи с интенсивным трением в зоне резания и увеличением упругих перемещений в технологической системе сила резания увеличивается. Проведен теоретический анализ отношения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и показана возможность его увеличения с целью повышения эффективности шлифования путем поддержания в процессе высокой режущей способности круга.

Ключевые слова: шлифование, резание, трение, шлифовальный круг, сила резания, упругое перемещение, технологическая система, скорость детали

Введение. При изготовлении высокоточных деталей на финишных операциях традиционно широко используются методы обработки свободным абразивом (доводка, полирование и т.д.). Однако в процессе обработки происходит шаржирование абразивных зерен в обрабатываемый материал (в особенности при обработке цветных металлов), что недопустимо. В связи с этим возникает задача применения более прогрессивных методов обработки, исключающих данное явление. Такими методами следует рассматривать шлифование и в ряде случаев финишную лезвийную обработку. Как известно, основным недостатком шлифования является наличие трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом, что приводит к повышению силовой и тепловой напряженности процесса резания, появлению на обрабатываемых поверхностях различных дефектов. Поэтому, чтобы повысить эффективность шлифования, необходимо исключить или уменьшить интенсивность трения в зоне резания, применяя для этого различные технологические методы и приемы. При этом важно также знать технологические возможности процесса шлифования, что требует разработки математической модели баланса энергии резания и трения при шлифовании.

Анализ последних достижений и литературы. В работах [1 – 3] показано значительное влияние интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на основные показатели процесса шлифования, что приводит к снижению производительности и качества обработки. Однако эти результаты получены на основе экспериментальных исследований. Теоретические решения в этом направлении фактически отсутствуют. Это ограничивает возможности достаточно полного раскрытия физической сущности процесса шлифования и требует проведения дальнейших исследований.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является обоснование условий повышения эффективности процесса шлифования на основе снижения интенсивности трения в зоне резания. В связи с этим в работе теоретически решается проблема раздельного учета энергий “чистого” резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

Материалы исследований. Для решения поставленной проблемы следует воспользоваться результатами теоретических исследований процесса шлифования, приведенными в работах [4, 5]. Согласно схемы шлифования прямой детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью V_{dem} (рис. 1), тангенциальную P_z и радиальную P_y составляющие силы резания можно представить в виде $P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}}$; $P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{тр}}$, где $P_{z_{рез}}$, $P_{y_{рез}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, обусловленные процессом “чистого” резания, Н; $P_{z_{тр}}$, $P_{y_{тр}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, обусловленные процессом трения связки круга с материалом, Н. Составляющие силы резания $P_{z_{рез}}$ и $P_{y_{рез}}$ определяются

$$[5]: P_{z_{рез}} = \sigma \cdot S_{мгн} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}} = \sigma \cdot \frac{F \cdot V_{dem0}}{V_{кр}}; \quad P_{y_{рез}} = \frac{P_{z_{рез}}}{K_{рез}} = \sigma \cdot \frac{F \cdot V_{dem0}}{V_{кр}} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma),$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $S_{мгн} = Q/V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²; $Q = F \cdot V_{dem0}$ – фактическая производительность обработки,

© И.А. Рябенков, Ф.В. Новиков, 2014

$\text{м}^3/\text{с}$; F – площадь поперечного сечения обрабатываемого прямолинейного образца, м^2 ; $V_{\text{дет}0}$ – фактическая линейная скорость съема материала, $\text{м}/\text{с}$ ($V_{\text{дет}0} \leq V_{\text{дет}}$); $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, $\text{м}/\text{с}$; $K_{\text{рез}} = \text{ctg}(\psi + \gamma)$; ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($\text{tg } \psi = f$ – коэффициент трения); γ – условный (отрицательный) передний угол режущего зерна.

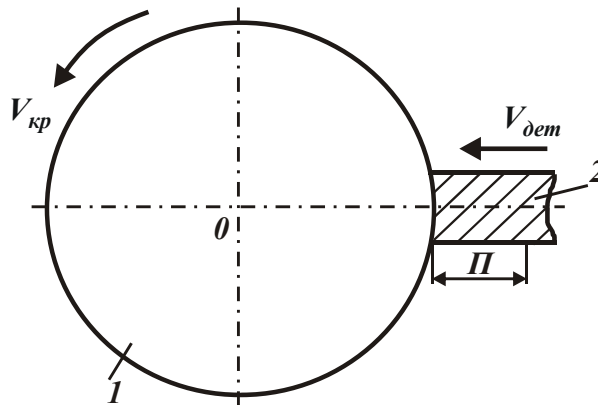


Рис. 1 – Расчетная схема процесса шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

Как следует из приведенных зависимостей, составляющие силы резания $P_{z_{\text{рез}}}$ и $P_{y_{\text{рез}}}$ тем меньше, чем меньше параметры σ , F , $V_{\text{дет}0}$ и больше $V_{\text{кр}}$.

Составляющие силы резания $P_{z_{\text{тр}}}$ и $P_{y_{\text{тр}}}$ появляются при наличии трения связки круга с обрабатываемым материалом, когда выполняется условие $V_{\text{дет}0} \leq V_{\text{дет}}$. В этом случае подводимый в зону резания обрабатываемый материал не успевает полностью удаляться режущими зернами и поэтому в технологической системе возникает упругое перемещение y , которое с течением времени обработки τ увеличивается по зависимости: $y = (V_{\text{дет}} - V_{\text{дет}0}) \cdot \tau$.

Соответственно величина упругого перемещения y предопределяет возникновение в технологической системе силы $P_{y_{\text{тр}}} = c \cdot y = c \cdot (V_{\text{дет}} - V_{\text{дет}0}) \cdot \tau$, где c – жесткость технологической системы, $\text{Н}/\text{м}$. Тангенциальная составляющая силы резания $P_{z_{\text{тр}}}$ связана с $P_{y_{\text{тр}}}$ соотношением $P_{z_{\text{тр}}} / P_{y_{\text{тр}}} = f_1$, где f_1 – коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом. Тогда $P_{z_{\text{тр}}} = f_1 \cdot c \cdot (V_{\text{дет}} - V_{\text{дет}0}) \cdot \tau$.

Как следует из приведенных зависимостей, составляющие силы резания $P_{z_{mp}}$ и $P_{y_{mp}}$ тем меньше, чем меньше параметры f_1 , c , $(V_{дет} - V_{дет0})$ и $\tau = \Pi / V_{дет}$, где Π – величина снимаемого припуска, м (рис. 1). При условии $V_{дет0} = V_{дет}$ составляющие силы резания $P_{z_{mp}}$ и $P_{y_{mp}}$ равны нулю. Поэтому при шлифовании необходимо стремиться выполнять условие $V_{дет0} \rightarrow V_{дет}$ за счет поддержания в процессе обработки высокой режущей способности шлифовального круга. Это достигается реализацией режима самозатачивания круга.

При работе круга в режиме затупления скорость $V_{дет0}$ будет уменьшаться, что приведет к нарушению условия $V_{дет0} = V_{дет}$, поскольку $V_{дет0}$ станет меньше $V_{дет}$. Окончательно зависимости для определения P_z , P_y и их отношения опишутся:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{дет} - V_{дет0}) \cdot \tau; \quad (9=1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) + c \cdot (V_{дет} - V_{дет0}) \cdot \tau; \quad (10=2)$$

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{\frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{дет} - V_{дет0}) \cdot \tau}{\frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) + c \cdot (V_{дет} - V_{дет0}) \cdot \tau}. \quad (11=3)$$

Результаты исследований. При условии $\tau \rightarrow 0$, т.е. в начальный момент обработки, зависимость (3) принимает вид: $K_{ш} = K_{рез} = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)$.

Как следует из рис. 2, с увеличением угла $(\psi + \gamma) \rightarrow 90^\circ$ коэффициент $K_{ш} \rightarrow 0$. С увеличением времени обработки τ вторые слагаемые в числителе и знаменателе зависимости (3) будут увеличиваться и станут больше первых слагаемых слагаемые в числителе и знаменателе зависимости (3). В этом случае зависимость (3) примет вид: $K_{ш} = f_1 = \operatorname{tg} \psi_1 = \operatorname{ctg}(90^\circ - \psi_1)$, где ψ_1 – условный угол трения связки круга с обрабатываемым материалом.

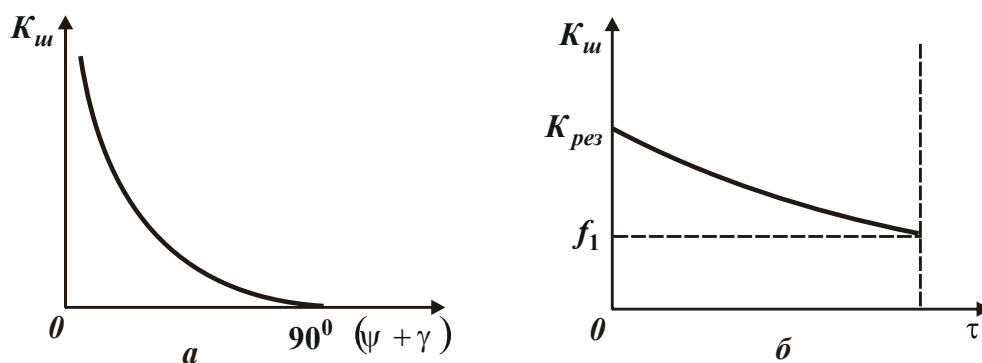


Рис. 2 – Зависимости $K_{u\tau}$ от угла $(\psi + \gamma)$ (а) и времени обработки τ (б)

Сравнивая приведенные зависимости, видно, что в начальный момент обработки при небольшом угле γ угол $(90^\circ - \psi_1)$ будет больше угла $(\psi + \gamma)$ и поэтому, согласно рис. 2,а, будет выполняться условие $ctg(90^\circ - \psi_1) < ctg(\psi + \gamma)$. Следовательно, $ctg(\psi + \gamma) > f_1$ и характер изменения коэффициента $K_{u\tau}$ с течением времени τ будет подчиняться зависимости, показанной на рис. 2,б.

Очевидно, при значении $K_{u\tau} = f_1$ процесс резания будет фактически отсутствовать, имеет место лишь трение связки круга с обрабатываемым материалом, что приводит к увеличению упругого перемещения y с течением времени обработки τ . Из этого условия можно определить угол $(\psi + \gamma)$, при котором процесс резания переходит в процесс трения связки круга с обрабатываемым материалом: $ctg(90^\circ - \psi_1) = ctg(\psi + \gamma)$ или $90^\circ - \psi_1 = \psi + \gamma$.

Предельное (максимальное) значение условного (отрицательного) переднего угла режущего зерна γ , при котором происходит переход от процесса резания к процессу трения связки круга с обрабатываемым материалом, равен $\gamma = 90^\circ - \psi_1 - \psi$. Как видно, угол γ тем меньше, чем больше углы ψ_1 и ψ . Например, при $\psi_1 = 20^\circ$ ($tg \psi_1 = f_1 = 0,36$) и $\psi = 10^\circ$ ($tg \psi = f = 0,18$) предельное отрицательное значение угла $\gamma = 60^\circ$, т.е. при больших значениях угла $\gamma > 60^\circ$ процесс шлифования практически неосуществим в связи со значительным упругим перемещением, возникающим в технологической системе, и соответственно значительной силой резания, которая будет непрерывно увеличиваться с течением времени обработки τ .

Анализируя зависимость (3), можно сделать вывод, что основным путем увеличения коэффициента $K_{ш}$ и повышения производительности и качества обработки при шлифовании является выполнение условия $V_{дет0} = V_{дет}$. В этом случае коэффициент $K_{ш}$ будет принимать наибольшее значение, и процесс шлифования будет протекать с наибольшей эффективностью. Дополнительным условием увеличения $K_{ш}$ следует рассматривать уменьшение угла $(\psi + \gamma)$ за счет обеспечения высокой режущей способности шлифовального круга.

Выводы. В работе получены аналитические зависимости для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания на основе раздельного учета энергий “чистого” резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Теоретически установлено, что с течением времени обработки в связи с интенсивным трением в зоне резания и увеличением упругих перемещений в технологической системе сила резания увеличивается. Проведен теоретический анализ отношения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и показана возможность его увеличения с целью повышения эффективности шлифования путем поддержания в процессе высокой режущей способности круга.

Список литературы: 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 3. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 4. Якимов О.В. Високопродуктивне шліфування: навчальний посібник / О.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков та ін. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с. 5. Новіков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.

Bibliography (transliterated): 1. Maslov E.N. Teoriya shlifovaniya metallov / E.N. Maslov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 319 s. 2. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A.V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s. 3. Lure G.B. Shlifovanie metallov / G.B. Lure. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 197 s. 4. Yakimov O.V. Vysokoproduktyvne shlifuvannya: navchalnyi posibnyk / O.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov ta in. – K.: ISDO, 1995. – 180 s. 5. Novikov F.V. Teoretychni osnovy mekhanichnoi obrobky vysokotochnykh detalei: monografiya / F.V. Novikov, I.O. Ryabenkov. – Kh. : Vyd. KNEU, 2013. – 352 s.