

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Дитиненко С.А., канд. техн. наук  
(Харьковский национальный экономический университет)

При шлифовании важно обеспечить требуемые параметры точности и качества обработки. Для этого на заключительном этапе шлифования используется выхаживание, т.е. обработка ведется с отключенной радиальной подачей [1, 2]. Как установлено на практике, применение выхаживания является исключительно важным фактором повышения эффективности шлифования. Вместе с тем, с физической точки зрения процесс выхаживания изучен недостаточно полно. Отсутствуют теоретические решения о закономерностях изменения основных параметров обработки и путях интенсификации процесса. Известные (экспериментальные) результаты справедливы для вполне конкретных рассматриваемых условий обработки, что не позволяет провести с единых позиций анализ закономерностей съема припуска и на этой основе выбрать оптимальные параметры финишной обработки. Целью работы является теоретический анализ путей повышения эффективности процесса выхаживания при шлифовании.

В работах [3, 4] получены аналитические зависимости для определения производительности обработки  $Q$  при выхаживании и отношение коэффициента резания  $K_{рез} = P_z / P_y$  к условному напряжению резания  $\sigma$ :

$$Q = \frac{\Pi}{\left( \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot B} + \frac{\sigma}{c \cdot K_{рез} \cdot V_{рез}} \right)}; \quad (1)$$

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{сдв}} \cdot \left( \frac{a_z}{\rho} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $P_z$ ,  $P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;  $\Pi$  – снимаемый припуск, м;  $\tau$  – время обработки, с;  $D_{дет}$  – диаметр обрабатываемой детали, м;  $B$  – ширина обработки, м;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $V_{рез}$  – скорость резания, м/с;  $HV$ ,  $\tau_{сдв}$  – твердость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабатываемого металла, Н/м<sup>2</sup>;  $a_z$  – толщина среза, м;  $\rho$  – радиус округления режущей кромки инструмента, м.

Как следует из зависимости (1), производительность обработки  $Q$  является функцией отношения  $K_{рез} / \sigma$ , которая в свою очередь зависит от толщины среза  $a_z$  и соответственно производительности обработки  $Q$ . Для установления данной закономерности, т.е. однозначного представления

производительности обработки, воспользуемся аналитической зависимостью для определения максимальной толщины среза  $a_z$  при шлифовании [4]:

$$a_z = \frac{315 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot V_{кр} \cdot \rho^2}, \quad (3)$$

где  $\bar{X}$ ,  $m$  – зернистость и объемная концентрация зерен в алмазном круге;  $V_{кр}, V_{дет}$  – скорости круга и детали, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $R_{кр}, R_{дет}$  – радиусы круга и детали, м;  $\rho$  – радиус округления вершины режущего зерна, м.

Подставляя (3) в зависимость (2), имеем:

$$\frac{K_{рез}}{\sigma} = \frac{\bar{X}^2}{3 \cdot \rho^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{HV^2 \cdot \tau_{одв}} \cdot \left[ \frac{315 \cdot \pi \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}}{m \cdot V_{кр}} \right]^2}. \quad (4)$$

Наибольшее влияние на отношение  $K_{рез}/\sigma$  (рассматривая при шлифовании отношение  $K_{ш}/\sigma$ , где  $K_{ш} = K_{рез}$  – коэффициент шлифования) оказывают параметры  $\rho$  и  $\bar{X}$ . По мере затупления зерен круга их радиусы  $\rho$  увеличиваются, что приводит к уменьшению отношения  $K_{ш}/\sigma$ . Следовательно, основным условием увеличения отношения  $K_{ш}/\sigma$  и повышения эффективности шлифования необходимо рассматривать обеспечение высокой остроты режущих зерен круга. Исходя из зависимости (4), увеличением зернистости круга  $\bar{X}$  также можно добиться существенного увеличения отношения  $K_{ш}/\sigma$ . Однако, как известно, с увеличением  $\bar{X}$  увеличивается радиус  $\rho$ , что препятствует росту отношения  $K_{ш}/\sigma$ . В рассматриваемом процессе выхаживания поперечная подача равна нулю. Съем металла происходит за счет упругих перемещений в технологической системе. Очевидно, фактическая глубина шлифования  $t$  с течением времени будет уменьшаться (вплоть до нуля) и, исходя из зависимости (4), будет приводить к уменьшению отношения  $K_{рез}/\sigma$  по закону  $t^{1/3}$ . Как видим, интенсивность уменьшения  $K_{рез}/\sigma$  не столь существенна.

Произведем количественную оценку влияния изменения соотношения  $K_{рез}/\sigma$  на производительность обработки  $Q$ . Для этого в зависимости (4) произведение параметров режима шлифования  $V_{дет} \cdot t$  выразим через производительность обработки  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ . Если подставить преобразованную зависимость (4) в (1), то приходим к уравнению относительно неизвестной величины  $Q$ :

$$M \cdot Q + N \cdot Q^{2/3} - P = 0, \quad (5)$$

где  $M = \frac{\tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot B}$ ;

$$N = \frac{3 \cdot \rho^2}{c \cdot V_{кр} \cdot \bar{X}^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{HV^2 \cdot \tau_{сдв}}{2} \left[ \frac{m \cdot V_{кр}}{315 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{V_{дет}}{B} \cdot \left( \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}} \right)}} \right]^2}$$

Данное уравнение решается численным методом. Поэтому упростим уравнение (5), рассматривая его в виде квадратного уравнения (с учетом  $x^2 = Q$ ):

$$M \cdot Q + N \cdot Q^{0.5} - \Pi = 0 \quad \text{или} \quad x^2 + \frac{N}{M} \cdot x - \frac{\Pi}{M} = 0. \quad (6)$$

Решая квадратное уравнение, после несложных преобразований, имеем:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{N}{2 \cdot \Pi} + \sqrt{\frac{N^2}{4 \cdot \Pi} + \frac{M}{\Pi}} \right)}}. \quad (7)$$

Из зависимости (7) следует, что увеличить производительность обработки  $Q$  можно увеличением величины снимаемого припуска  $\Pi$  и уменьшением параметров  $N$  и  $M$ . Уменьшение  $N$  предполагает уменьшение  $\rho$ ,  $B$ ,  $m$  и увеличение  $c$ ,  $V_{кр}$ ,  $V_{дет}$ ,  $\bar{X}$ . Уменьшение  $N$  предполагает уменьшение времени обработки  $\tau$ , т.е. с течением времени  $\tau$  производительность обработки  $Q$  будет уменьшаться. Это согласуется с начальной зависимостью (1), рассматривая в ней отношение  $K_{рез} / \sigma$  заданным. Однако, влияние времени обработки  $\tau$  на производительность обработки  $Q$  в зависимости (7) значительно ниже, чем в зависимости (1). Следовательно, увеличивается время устранения погрешности размера обрабатываемой детали. Чтобы усилить влияние времени обработки  $\tau$  на производительность  $Q$ , необходимо в зависимости (7) существенно уменьшить параметр  $N$ , а параметр  $M$ , наоборот, увеличить.

Уменьшение параметра  $N$  связано в первую очередь с уменьшением радиуса округления вершины режущего зерна  $\rho$  и увеличением зернистости круга  $\bar{X}$ . Увеличить параметр  $M$  можно главным образом за счет уменьшения ширины шлифования  $B$ , так как диаметр детали  $D_{дет}$  – заданная величина.

Если в зависимости (7) слагаемое  $\frac{N^2}{4 \cdot \Pi^2}$  будет больше слагаемого  $\frac{M}{\Pi}$ , то влияние времени обработки  $\tau$  на производительность обработки будет несущественно и процесс исправления погрешности обработки “растянется” во времени. Это подтверждается практикой шлифования, в особенности при резании затупленным инструментом, когда в процессе длительного

выхаживания не удастся добиться заметного уменьшения величины упругого перемещения.

Данная закономерность имеет место и при шлифовании алмазным инструментом. В этом случае определяющим фактором является существенное увеличение условного напряжения резания  $\sigma$  за счет увеличения трения связки круга (в особенности металлической связки) с обрабатываемым материалом. В результате знаменатель зависимости (1) резко увеличивается, соответственно производительность обработки  $Q$  неограниченно уменьшается, что не позволяет практически реализовать процесс выхаживания.

Произведем расчет и анализ шероховатости обработанной поверхности на этапе выхаживания при шлифовании. При шлифовании прямолинейного образца без поперечной подачи (т.е. при выхаживании) уравнение, описывающее баланс перемещений в технологической системе, имеет вид [3]:

$$y + V_{\phi} \cdot \tau = \Pi, \quad (8)$$

где  $y$  – величина упругого перемещения в технологической системе, м;  $V_{\phi}$  – линейная скорость съема металла, м/с;  $\Pi$  – величина снимаемого припуска при выхаживании, м.

Величина упругого перемещения  $y$  определяется радиальной составляющей силы резания  $P_y = c \cdot y$ . Предположим, что при абразивной обработке в контакте с обрабатываемым материалом находится  $n_0$  зерен. Если принять, что режущие зерна выступают над уровнем связки абразивного или алмазно-абразивного инструмента на одинаковую высоту и имеют конусообразную форму режущей части с углом при вершине  $2 \cdot \gamma$ , то для вдавливания режущих зерен в обрабатываемый металл необходимо приложить радиальную силу  $P_y$ :

$$P_y = \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot R_{max}^2 \cdot n_0 \cdot HV, \quad (9)$$

где  $R_{max}$  – глубина вдавливания режущего зерна в обрабатываемый металл (условно равна максимальной высоте микронеровностей обработанной поверхности – параметру шероховатости обработки  $R_{max}$ ), м;  $n_0 = S \cdot k$ ;  $S$  – площадь контакта инструмента с обрабатываемой деталью, м<sup>2</sup>;  $k$  – поверхностная концентрация зерен инструмента, шт./м<sup>2</sup>.

Параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  при шлифовании образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью  $V'_{dem}$ , определяется зависимостью [5]:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{V'_{dem}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}. \quad (10)$$

Параметр  $V'_{dem}$  равен  $V_{\phi}$ . Разрешим зависимость (10) относительно скорости  $V'_{dem} = V_{\phi}$  и подставим полученную зависимость в уравнение (8). Подставив в уравнение (8) также зависимость (9), имеем

$$R_{max} = \sqrt{\frac{P \cdot c}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot (\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot S \cdot HV + 2 \cdot V_{кр} \cdot c \cdot \tau)}}. \quad (11)$$

Как видим, с течением времени обработки  $\tau$  параметр шероховатости  $R_{max}$  уменьшается. Более существенное влияние на параметр  $R_{max}$  оказывают параметры  $P, \gamma, k$ . Важнейшим условием уменьшения параметра  $R_{max}$  следует рассматривать увеличение поверхностной концентрации зерен  $k$ , т.к. увеличение угла  $\gamma$  ведет к уменьшению отношения  $a_z / \rho$ , увеличению силовой напряженности и ухудшению процесса резания.

Для сравнения определим параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  при шлифовании по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием  $P_y$ , определяемым зависимостью (9):

$$R_{max} = \sqrt{\frac{c \cdot y}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot HV \cdot k \cdot S}}. \quad (12)$$

При условии  $\tau = 0$  зависимость (11) принимает вид зависимости (12), рассматривая при этом  $y = P$ . Это означает, что обработка по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием  $P_y$  приводит к большим значениям параметра шероховатости обработки  $R_{max}$ , чем обработка по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе. Значения  $R_{max}$  равны для двух рассматриваемых схем лишь в начальный момент обработки (при условии  $\tau = 0$ ). Следовательно, с точки зрения уменьшения параметра шероховатости  $R_{max}$  эффективно обработку вести по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе, т.е. реализуя процесс выхаживания.

Таким образом, в работе произведена оценка влияния параметров силовой напряженности процесса резания на точность и производительность обработки на этапе выхаживания при шлифовании. Определены факторы, наиболее ответственные за формирование точности и производительности обработки при выхаживании. Аналитически описана шероховатость обработки при выхаживании и установлены условия ее уменьшения.

**Список литературы:** 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов Б.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 5. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.03.01 / Одес. гос. политехн. ун-т. – Одесса, 1995. – 36 с.