

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЫХАЖИВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Дитиненко С.А.**, канд. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнецца)

**Новиков Г.В.**, канд. техн. наук

(Научный Центр НТК “Эльбор”, г. Харьков)

*An assessment of the influence of parameters of the power tension cutting process on the accuracy and performance of the processing at the stage of nursing during grinding. The factors responsible for the formation of precision and productivity in the processing of nursing. Analytically described roughness treatment at nursing and established the conditions for its reduction, taking into account the simultaneous increase the accuracy of the treated surface*

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 по критериям точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

В работах [3, 4] приведены аналитические зависимости для определения производительности обработки  $Q$  при выхаживании и отношения 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  $P_z$ ,  $P_y$  – соответственно 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;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;  $V_{рез}$  – скорость резания (скорость враще-

ния абразивного инструмента), м/с;  $HV$ ,  $\tau_{сдв}$  – соответственно твердость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабатываемого металла, Н/м<sup>2</sup>;  $a_z$  – толщина среза при абразивной обработке, 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  $\bar{X}$  и  $m$  – 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 зерна, м.

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

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

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 выжигивания при шлифовании 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 зависимость (4) в (1), то приходим к уравнению относительно неизвестной величины  $Q$ :

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

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 может быть решено лишь численным методом. Для наглядности решения упростим уравнение (5), рассматривая его в виде квадратного уравнения и принимая  $x^2 = Q$ :

$$M \cdot Q + N \cdot Q^{0,5} - \Pi = 0 \text{ или } x^2 + \frac{N}{M} \cdot x - \frac{\Pi}{M} = 0. \quad (6)$$

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 ре-

жущего 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  $N^2 / 4\Pi^2$  будет больше  $M / \Pi$ , 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 удается 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 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  $y$  – упругое перемещение в технологической системе, м;  $V_{\phi}$  – линейная скорость съема металла, м/с;  $\Pi$  – снимаемый припуск при выхаживании, м.

Упругое перемещение  $y$  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  $P_y$ , равную

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

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  $V'_{дет}$ , определяется зависимостью [5]:

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

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

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

Как видно, с течением времени обработки  $\tau$  параметр шероховатости  $R_{max}$  уменьшается. Более существенное влияние на параметр  $R_{max}$  оказывают параметры  $\Pi, \gamma, k$ . 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)

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

При условии  $\tau = 0$  зависимость (11) принимает вид зависимости (12), рассматривая при этом  $y = \Pi$ . 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, произведена оценка влияния параметров силовой напряженности процесса резания на точность и производительность обработки на этапе выхаживания при шлифовании. Определены факторы, 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.