

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ВЫХАЖИВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

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 σ :

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

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

где P_z , P_y – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; Π – снимаемый припуск, м; τ – 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 вращения абразивного инструмента), м/с; HV , $\tau_{сдв}$ – соответственно твердость (по Виккерсу) и предел прочности на сдвиг обрабатываемого металла, Н/м²; a_z – толщина среза при абразивной обработке, м; ρ – 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; ρ - 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 ρ и \bar{X} . По мере затупления зерен круга их радиусы ρ 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 ρ , что препятствует росту отношения $K_{ш}/\sigma$.

В рассматриваемом процессе выхаживания 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 Π и уменьшением параметров N и M . Уменьшение N предполагает уменьшение ρ , B , m и увеличение c , $V_{кр}$, $V_{дет}$, \bar{X} . Уменьшение N предполагает уменьшение времени обработки τ , т.е. с течением времени τ производительность обработки Q будет уменьшаться. Это согласуется с начальной зависимостью (1), рассматривая в ней отношение $K_{рез} / \sigma$ заданным. Однако, влияние времени обработки τ 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 τ 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 ρ 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 τ 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 σ 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_{ϕ} – линейная скорость съема металла, м/с; Π – 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

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

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, м²; k – поверхностная концентрация зерен инструмента, шт./м².

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

$$R_{max} = \sqrt{\frac{V'_{\text{дем}}}{2 \cdot t g \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}. \quad (10)$$

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 τ параметр шероховатости R_{max} уменьшается. Более существенное влияние на параметр R_{max} оказывают параметры Π, γ, k . Важнейшим условием уменьшения параметра R_{max} следует рассматривать увеличение поверхностной концентрации зерен k , т.к. увеличение угла γ ведет к уменьшению отношения a_z / ρ , 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. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов. – 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.

