

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ МНОГОПРОХОДНОМ И ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ

Постановка проблемы

Шлифование является основным методом абразивной обработки, получившим широкое применение как на операциях окончательного, так и предварительного шлифования с целью обеспечения высоких показателей точности и качества обрабатываемых поверхностей [1, 2]. Однако, в силу высокой теплонпряженности процесса шлифования зачастую на обрабатываемых поверхностях образуются прижоги и микротрещины, а по производительности шлифование уступает процессам лезвийной обработки, что в ряде случаев ограничивает его эффективное применение. Поэтому изыскание путей повышения качества и производительности обработки при шлифовании и расширение его технологических возможностей является актуальной проблемой, направленной на создание конкурентоспособной машиностроительной продукции.

Анализ последних исследований и публикаций

На практике реализуются в основном две схемы шлифования – многопроходное и глубинное шлифование [3]. Установлено, что с точки зрения повышения производительности и качества обработки, а также снижения износа круга глубинное шлифование располагает большими технологическими возможностями, чем многопроходное шлифование [4, 5]. Вместе с тем, в научно-технической литературе до сих пор отсутствует четкое представление о максимально возможной производительности обработки, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга, которую можно достичь при многопроходном и глубинном шлифовании. В одних работах предпочтение отдается многопроходному шлифованию, а в других – глубинному шлифованию. Поэтому важно знать технологические возможности многопроходного и глубинного шлифования по уровню достигаемой производительности обработки.

Цель статьи – теоретический анализ максимально возможной производительности обработки, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга и реализуемой в условиях многопроходного и глубинного шлифования.

Изложение основного материала

В работах [4, 5, 6] предложен теоретический подход к определению максимально возможной производительности обработки Q при шлифовании с учетом вероятностного характера участия зерен в резании и прочностных свойств рабочей поверхности круга, обобщенно определяемых предельной (прочностной) толщиной среза:

$$Q = \frac{\sqrt{2} \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot B \cdot t \cdot V_{kp}}{9 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{kp}} + \frac{1}{R_{oem}}}} \cdot \left(\frac{b^3}{2 \cdot \sqrt{t_{iT}}} + \sum_{j=0}^{i-2} t_{jT}^{2,5} \right), \quad (1)$$

где γ – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна; k – поверхностная концентрация зерен круга, штук/м²; b – максимальная высота выступания режущих зерен над уровнем связки круга, равная предельной (прочностной) толщиной среза, м; B – ширина шлифования, м; t – номинальная глубина шлифования, м; V_{kp} – скорость круга, м/с; R_{kp}, R_{oem} – радиусы круга и детали, м; t_{iT} – текущее значение фактической глубины шлифования на i -том проходе круга, м; t_{jT} – текущее значение величины t_{iT} , м.

Скорость детали V_{oem} для заданного параметра b определяется

$$V_{oem} = \frac{Q}{B \cdot t} = \frac{\sqrt{2} \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{kp}}{9 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{kp}} + \frac{1}{R_{oem}}}} \cdot \left(\frac{b^3}{2 \cdot \sqrt{t_{iT}}} + \sum_{j=0}^{i-2} t_{jT}^{2,5} \right). \quad (2)$$

При глубинном шлифовании производительность обработки Q определяется упрощенной зависимостью (1):

$$Q = \frac{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot B \cdot b^2 \cdot V_{kp} \cdot \sqrt{t}}{12,7 \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{kp}} + \frac{1}{R_{oem}}}}. \quad (3)$$

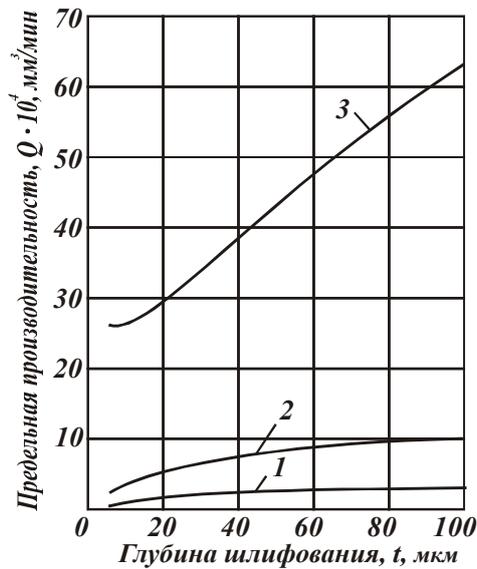


Рис.1. Зависимость предельной производительности обработки Q от глубины шлифования t : $\gamma=45^\circ$; $k=10$ шт/мм²; $B=20$ мкм; $R_{дет}=50$ мм; $R_{кр}=100$ мм; $V_{кр}=30$ м/с; 1 – $b=10$ мкм; 2 – $b=20$ мкм; 3 – $b=50$ мкм.

На рис. 1 [6] приведены рассчитанные по зависимости (1) значения предельной производительности обработки Q для заданных значений максимальной толщины среза, равной параметру b . Как видно, при условии $t < b$ производительность обработки Q остается фактически неизменной с увеличением глубины шлифования t , а при условии $t > b$ – непрерывно увеличивается. Это свидетельствует об эффективности применения глубинного шлифования. Расчетами установлено, что эффект обработки в данном случае обусловлен увеличением процента работающих зерен (до 45%), тогда как при многопроходном шлифовании он значительно меньше и составляет 5–10%. С кинематической точки зрения зерна проходят в основном ”след в след”, не совершая полезной работы. Это указывает на то, что при многопроходном шлифовании мало используются потенциальные возможности рабочей поверхности круга и, следовательно, существуют резервы повышения эффективности шлифования. Чтобы их выявить и обосновать условия повышения эффективности многопроходного шлифования, определим количество зерен n , участвующих в сьеме материала и формировании микропрофиля на обрабатываемой поверхности при многопроходном и глубинном шлифовании. Для этого рассмотрим расчетную схему параметров плоского многопроходного шлифования, приведенную на рис. 2,а. Поскольку скорость круга $V_{кр}$ значительно превышает скорость детали $V_{дет}$, то длина единичного среза на рис. 2,а показана примерно равной длине дуги контакта круга с обрабатываемой деталью l .

Как следует из зависимости (1), при многопроходном шлифовании формирование полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности происходит за определенное количество проходов круга i , соответствующее фактической глубине шлифования $t_{ф} = i \cdot t$. Тогда суммарное время формирования полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности определится: $\tau_{мног} = i \cdot \tau_0$, где $i = b/t$; $\tau_0 = l/V_{дет}$ – продолжительность контакта фиксированного сечения обрабатываемой детали (движущейся со скоростью $V_{дет}$) с рабочей поверхностью круга, с; l – длина дуги контакта круга с деталью, м.

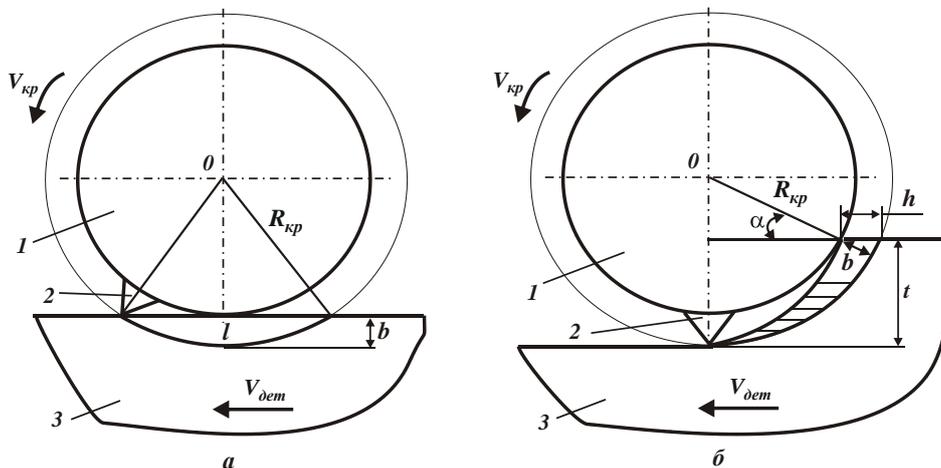


Рис. 2. Расчетная схема параметров плоского многопроходного (а) и глубинного (б) шлифования: 1 – круг; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый материал.

При плоском многопроходном шлифовании (рис. 2,а) параметр l определится

$$l = 2 \cdot \sqrt{R_{кр}^2 - (R_{кр} - b)^2} \approx 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot b}. \quad (4)$$

Тогда окончательно получим

$$\tau_{мног} = \frac{b}{t} \cdot \frac{l}{V_{дет}} = \frac{2 \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot b}}{Q_{уд}}, \quad (5)$$

где $Q_{уд} = t \cdot V_{дет}$ – удельная производительность обработки, м³/(м·с).

Количество зерен n , участвующих в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности, равно

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau_{мног} = \frac{2 \cdot k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot b}}{Q_{уд}}. \quad (6)$$

Как видно, параметр n не зависит от глубины шлифования t , а определяется удельной производительностью обработки $Q_{уд}$. Из всех входящих в зависимость (6) параметров наибольшее влияние на n оказывает параметр b , т.е. важно обеспечить более прочное удержание зерен в связке и соответственно повысить прочность зерен.

При глубинном шлифовании время формирования полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности равно: $\tau_{зл} = h/V_{дет}$ (рис. 2,б), где $h = b/\cos \alpha$ – глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, м; α – угол входа обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга:

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{R_{кр}^2 - (R_{кр} - t)^2}}{R_{кр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{кр}}}. \quad (7)$$

После преобразований, получено

$$\tau_{зл} = \frac{b}{V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{2 \cdot t}}. \quad (8)$$

Количество зерен n , участвующих в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности, равно

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau_{зл} = \frac{k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot b}{Q_{уд}} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр} \cdot t}{2}}. \quad (9)$$

Подставим в (9) зависимость (3), рассматривая $Q_{уд} = Q/B$ и принимая для плоского шлифования $R_{дет} \rightarrow \infty$. Тогда зависимость (9) примет простой вид

$$n = \frac{9 \cdot B}{tg \gamma \cdot b}. \quad (10)$$

В данном случае увеличить количество зерен n можно, главным образом, за счет уменьшения параметра b . Однако, исходя из зависимости (3), это ведет к уменьшению производительности обработки Q , что не эффективно.

Сравним значения n при многопроходном и глубинном шлифовании, для чего обозначим входящие в зависимость (6) параметры следующим образом: $n_{мног}$, $b_{мног}$, $Q_{мног}$ и соответственно входящие в зависимость (9) параметры: $n_{зл}$, $b_{зл}$, $Q_{зл}$, $t_{зл}$. Тогда

$$\frac{n_{зл}}{n_{мног}} = 0,25 \cdot \frac{b_{зл}}{b_{мног}} \cdot \frac{Q_{мног}}{Q_{зл}} \cdot \sqrt{\frac{t_{зл}}{b_{мног}}}. \quad (11)$$

Из зависимости (1) и рис. 1 следует, что при $b_{зл} = b_{мног}$ и $t_{зл} = b_{мног}$ значения $Q_{зл}$ и $Q_{мног}$ примерно равны, а с увеличением глубины шлифования $t_{зл} > b_{мног}$ производительность глубинного шлифования $Q_{зл}$ увеличивается по закону $\sqrt{t_{зл}}$. Тогда, очевидно, относительная величина $\frac{Q_{мног}}{Q_{зл}} \cdot \sqrt{\frac{t_{зл}}{b_{мног}}}$, входящая в зависимость (11),

будет оставаться постоянной с увеличением глубины шлифования $t_{зл}$, примерно равной единице. Следовательно, отношение $n_{зл}/n_{мног} \approx 0,25$. Это означает, что в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности при многопроходном шлифовании участвует в 4 раза больше зерен, чем при глубинном шлифовании. Этим, собственно, и объясняется тот факт, что при многопроходном шлифовании зерна проходят фактически "след в след", как бы не совершая полезной работы. Однако, с другой стороны, это указывает на меньшую силовую напряженность режущих зерен при многопроходном шлифовании и меньший их износ. В связи с этим, исхо-

дя из условий прочности удержания зерен в связке круга и собственно прочности зерен, может быть увеличена предельная (прочностная) толщина среза, в данном случае равная параметру $b_{\text{мног}}$, что позволит увеличить производительность обработки $Q_{\text{мног}}$.

Из зависимости (1) вытекает, что $Q_{\text{мног}} \approx b_{\text{мног}}^2$. Если подставить данную зависимость в (11), то видно, что отношение $n_{\text{зл}} / n_{\text{мног}}$ будет увеличиваться по закону $\sqrt{b_{\text{мног}}}$. При увеличении параметра $b_{\text{мног}}$ в 16 раз отношение $n_{\text{зл}} / n_{\text{мног}} \rightarrow 1$. В этом случае количество зерен n , участвующих в формировании полного микропрофиля на обрабатываемой поверхности при многопроходном и глубинном шлифовании, будет примерно одинаковым. Однако при этом существенно увеличится параметр $b_{\text{мног}}$, что приведет к соответствующему увеличению производительности обработки при многопроходном шлифовании. Поскольку параметры $Q_{\text{мног}}$ и $b_{\text{мног}}$ связаны примерно квадратичной зависимостью $Q_{\text{мног}} \approx b_{\text{мног}}^2$, то возможно весьма значительное увеличение производительности обработки при многопроходном шлифовании – до значений производительности глубинного шлифования $Q_{\text{зл}}$ и выше.

Таким образом, в работе получила дальнейшее развитие математическая модель определения условий повышения производительности обработки при многопроходном и глубинном шлифовании. Доказано, что основным путем повышения производительности обработки при многопроходном шлифовании является увеличение максимальной толщины среза, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга, в данном случае равной параметру $b_{\text{мног}}$. При глубинном шлифовании увеличить производительность обработки можно главным образом за счет увеличения глубины шлифования при соответствующем уменьшении скорости детали $V_{\text{дет}}$ по зависимости (2). Однако в этом случае производительность обработки увеличивается по закону $Q_{\text{зл}} \approx \sqrt{t_{\text{зл}}}$, тогда как при многопроходном шлифовании – по закону $Q_{\text{мног}} \approx b_{\text{мног}}^2$, т.е. со значительно большей интенсивностью. Следовательно, производительность обработки при многопроходном шлифовании связана с максимальной толщиной среза квадратичной зависимостью, тогда как при глубинном шлифовании глубина шлифования входит в зависимость для определения производительности обработки лишь в степени 0,5. Это указывает на существование значительных резервов повышения производительности обработки при многопроходном шлифовании, связанных с увеличением максимальной толщины среза. Основным ограничением в этом случае может быть недостаточное выступание зерен над уровнем связки круга, что требует увеличения зернистости и твердости круга. Увеличение толщин срезов в этом случае также будет способствовать уменьшению энергоемкости обработки и соответственно снижению вероятности появления на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов.

Выводы

Теоретически установлена максимально возможная производительность обработки, обусловленная прочностными свойствами рабочей поверхности круга, и доказана возможность ее реализации в условиях многопроходного шлифования.

Перечень ссылок

1. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования металлов / *Е.Н. Маслов*. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. *Лурье Г.Б.* Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / *Г.Б. Лурье*. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
3. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / *С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов*. – М.: Машиностроение, 1984. – 62 с.
4. *Якимов А.В.* Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами / *А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, А.А. Якимов*. – К.: Техніка, 1993. – 152 с.
5. *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / *Ф.В. Новиков*. – Одесса, 1995. – 36 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.

Статья поступила 30.05.2011г.