

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ЭТАПЕ ВЫХАЖИВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Бережной Р.А.**

*(ХНЭУ, г. Харьков, Украина)*

### Введение

Шлифование является наиболее производительным и распространенным методом обеспечения высоких показателей точности и качества обрабатываемых поверхностей [1, 2]. В особой мере это относится к окончательному этапу шлифования – выхаживанию, когда обработка производится с отключенной радиальной подачей. В этом случае процесс съема обрабатываемого материала и формирования параметров качества обработки происходит под действием упруго-восстанавливающей силы, возникающей в технологической системе. Чем выше режущая способность круга и жесткость технологической системы, тем за меньшее время можно добиться требуемых показателей точности обработки.

В работах [3, 4] разработана математическая модель формирования упругих перемещений при шлифовании, в том числе и на этапе выхаживания. Вместе с тем, не приведены аналитические решения, позволяющие с единых позиций описать изменение величины упругого перемещения и производительности обработки на этапе выхаживания при дискретном и постоянном характере контакта круга с обрабатываемой деталью. Дискретный характер контакта предполагает периодический выход круга из контакта с деталью, например, при плоском или круглом продольном шлифовании. В конечном итоге это не позволяет раскрыть технологические возможности процесса выхаживания в плане повышения точности и производительности обработки. Поэтому целью настоящей работы является обоснование путей повышения точности и производительности обработки на этапе выхаживания при шлифовании на основе исследования закономерностей изменения возникающих в технологической системе упругих перемещений в условиях дискретного и постоянного характера контакта круга с обрабатываемой деталью.

### Основное содержание работы

Предположим, что в технологической системе создан начальный натяг величиной  $y_0$  и шлифование производится с отключенной радиальной подачей станка, т.е. съем материала происходит за счет возникающих в технологической системе упругих перемещений. Тогда на первом проходе круга (в продольном направлении) будет выполняться условие:

$$y_0 = t_1 + y, \quad (1)$$

где  $t_1$  – глубина шлифования на первом проходе круга, м;

$y$  – величина упругого перемещения в технологической системе, определяемая зависимостью [4]:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дет} \cdot t_1}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = m \cdot t_1, \quad (2)$$

$P_z, P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;

$K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования;

$c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;

$P_z = \sigma \cdot S_{сум}$ ;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;

$S_{сум} = Q / V_{кр}$  – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м<sup>2</sup>;

$Q = B \cdot V_{дет} \cdot t_1$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;

$B$  – ширина шлифования, м;

$V_{дет}, V_{кр}$  – скорости детали и круга, м/с;  $m = \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ .

Разрешая зависимость (1) относительно  $t_1$ , имеем

$$t_1 = \frac{y_0}{(1+m)} = y_0 \cdot m_1, \quad (3)$$

где  $m_1 = \frac{1}{(1+m)}$ .

На втором проходе круга условие (1) видоизменится:

$$y_0 - t_1 = t_2 + y \quad \text{или} \quad y_0 - t_1 = t_2 + m \cdot t_2, \quad (4)$$

где  $t_2$  – глубина шлифования на втором проходе круга, м.

Разрешим зависимость (4) относительно  $t_2$ :

$$t_2 = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1). \quad (5)$$

На третьем проходе круга условие (1) опишется:

$$y_0 - t_1 - t_2 = t_3 + y \quad \text{или} \quad y_0 - t_1 - t_2 = t_3 + m \cdot t_3, \quad (6)$$

где  $t_3$  – глубина шлифования на третьем проходе круга, м.

Разрешая зависимость (6) относительно  $t_3$ , имеем

$$t_3 = y_0 \cdot m_1 \cdot [1 - m_1 - m_1 \cdot (1 - m_1)] = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)^2. \quad (7)$$

На четвертом проходе круга условие (1) опишется:

$$y_0 - t_1 - t_2 - t_3 = t_4 + y \quad \text{или} \quad y_0 - t_1 - t_2 - t_3 = t_4 + m \cdot t_4, \quad (8)$$

где  $t_4$  – глубина шлифования на четвертом проходе круга, м.

Разрешая зависимость (8) относительно  $t_3$ , имеем

$$t_4 = y_0 \cdot m_1 \cdot \left[ 1 - m_1 - m_1 \cdot (1 - m_1) - m_1 \cdot (1 - m_1)^2 \right] = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)^3. \quad (9)$$

Данное решение можно распространить для определения глубины шлифования  $t_n$  на  $n$ -ном проходе круга:

$$t_n = y_0 \cdot m_1 \cdot (1 - m_1)^{n-1}. \quad (10)$$

Как следует из табл. 1, с увеличением количества проходов круга  $n$  глубина шлифования  $t_n$ , рассчитанная по зависимости (10), уменьшается. Причем, характер изменения  $t_n$  с увеличением количества проходов круга  $n$  подчиняется закону бесконечно убывающей геометрической прогрессии со знаменателем  $(1 - m_1)$ .

Таблица 1. Расчетные значения глубины шлифования  $t_n$  (в мм) для  $y_0 = 1$  мм

$n$	1	2	3	4	5
для $m = 0,5$	0,67	0,221	0,072	0,023	0,07
для $m = 1$	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,0312
для $m = 2$	0,33	0,221	0,148	0,1	0,066
для $m = 3$	0,25	0,187	0,14	0,105	0,078

Преобразуем зависимость (10), для чего умножим и разделим ее на величину  $(1 - m_1)$ :

$$t_n = y_0 \cdot \frac{m_1}{(1 - m_1)} \cdot (1 - m_1)^n = \frac{y_0}{m} \cdot (1 - m_1)^n. \quad (11)$$

В результате пришли к биному Ньютона:

$$(1 - m_1)^n = 1 - n \cdot m_1 + \frac{n \cdot (n - 1)}{1 \cdot 2} \cdot m_1^2 - \frac{n \cdot (n - 1) \cdot (n - 2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot m_1^3 + \dots \quad (12)$$

Учитывая то, что  $m_1 < 1$ , а  $n$  – относительно большая величина, в разложении (12) преобладают первые слагаемые. Поэтому с достаточной для практики точностью можно принять:

$$(1 - m_1)^n \approx 1 - n \cdot m_1 + \frac{n^2}{1 \cdot 2} \cdot m_1^2 - \frac{n^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot m_1^3 + \dots = e^{-n \cdot m_1} = e^{-\frac{n}{(1+m)}}. \quad (13)$$

Тогда зависимость (11) опишется:

$$t_n = \frac{y_0}{m} \cdot e^{-\frac{n}{1+m}} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}} \cdot y_0 \cdot e^{-\left(1 + \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}\right) \cdot n} \quad (14)$$

При условии  $m > 1$  зависимость (14) упростится:

$$t_n = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}} \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}} \cdot n} \quad (15)$$

Как видно, глубина шлифования  $t_n$  с увеличением количества проходов круга  $n$  уменьшается по экспоненциальному закону. По такому же закону уменьшается и производительность обработки:

$$Q = B \cdot V_{дем} \cdot t_n = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}} \cdot n} \quad (16)$$

Сравним данное решение с аналогичным решением [5], полученным применительно к шлифованию прямолинейного образца с площадью поперечного сечения  $S$ , движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью  $V_{рез}(\tau)$ :

$$Q = V_{рез}(\tau) \cdot S = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot S} \cdot \tau} \quad (17)$$

Распространим данное решение для случая выхаживания при плоском шлифовании детали с площадью обрабатываемой поверхности  $S = B \cdot L$ , где  $B, L$  – ширина и длина обрабатываемой детали, м. Основное время обработки  $\tau$  при плоском шлифовании можно представить

$$\tau = \tau_0 \cdot n,$$

где  $\tau_0 = L/V_{дем}$  – время одного продольного хода круга, с;

$V_{дем}$  – скорость продольной подачи (скорость детали), м/с;  $n$  – количество проходов круга.

Тогда зависимость (17) примет вид

$$Q = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma} \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B \cdot V_{дем}} \cdot n} \quad (18)$$

В итоге пришли к зависимости (16). Из этого можно заключить, что процессы выхаживания с постоянным и дискретным характером контакта круга с обрабатываемой деталью при условии  $m > 1$  подчиняются одним физическим закономерностям и анали-

тически описываются одними и теми же зависимостями. Таким образом, с единых позиций аналитически описаны закономерности съема припуска на этапе выхаживания при плоском шлифовании. Показано, что глубина шлифования  $t_n$ , а также скорость  $V_{рез}(\tau)$  и производительность обработки  $Q$  по проходам круга уменьшаются. При этом характер изменения величины упругого перемещения  $y$  подчиняется зависимости (2), выражая в ней производительность обработки  $Q$  зависимостью (18):

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{дет}}} \quad (19)$$

Как видно, величина  $y$  с увеличением количества проходов круга  $n$  неограниченно уменьшается. Интенсивность ее уменьшения тем больше, чем больше параметры  $c, K_{ш}, V_{кр}$  и меньше  $\sigma, B, V_{дет}$ . Следовательно, при выхаживании эффективно скорость детали  $V_{дет}$  уменьшать. Однако, при этом необходимо учитывать то, что условное напряжение резания  $\sigma$  с уменьшением  $V_{дет}$ , как правило, увеличивается. Поэтому должно существовать оптимальное значение  $V_{дет}$ , при котором произведение  $\sigma \cdot V_{дет}$  принимает наименьшее значение и приводит к уменьшению величины  $y$ .

Использование полученных результатов исследований позволило научно обоснованно подойти к выбору оптимальных условий обработки на операциях плоского шлифования деталей из закаленных сталей и твердых сплавов. В результате решены задачи интенсификации процесса съема припуска и обеспечения высоких показателей точности обработки (на этапе выхаживания при плоском шлифовании) за счет уменьшения упругих перемещений, возникающих в технологической системе. Достигнуто увеличение до двух раз производительности финишной обработки.

### Выводы

Теоретически обоснованы закономерности съема припуска и формирования точности обработки на этапе выхаживания при шлифовании в условиях дискретного и постоянного характера контакта круга с обрабатываемой деталью. Показано, что характер контакта круга с деталью не влияет на изменение во времени производительности обработки и величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе и определяющего точность обработки. Это принципиально новое решение, т.к. в научно-технической литературе отсутствуют аналитические решения, позволяющие с единых позиций описать изменение величины упругого перемещения на этапе выхаживания при дискретном и постоянном характере контакта круга с деталью. Полученное решение позволяет раскрыть технологические возможности процесса выхаживания в плане повышения точности и производительности обработки. На его основе определены оптимальные условия обработки. Показана эффективность увеличения жесткости технологической системы, скорости круга, коэффициента шлифования, равного отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания, и уменьшения условного напряжения резания (энергоемкости обработки), ширины шлифования и скорости детали.

**Список литературы:** 1. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 2. Корчак С.Н. Прогрессивная технология и автоматизация круглого шлифования. – М.: Машиностроение, 1968. – 108 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Но-

викова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов". – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 7. "Точность обработки деталей машин". – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с. 5. 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.

#### ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ НА ЕТАПІ ВИХОДЖУВАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ

Бережний Р.А.

У роботі наведені результати досліджень закономірностей знімання припуску і формування точності обробки на етапі виходжування при шліфуванні в умовах дискретного і постійного характеру контакту круга з оброблюваною деталлю. Показано, що характер контакту круга з деталлю не впливає на зміну в часі продуктивності обробки та величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі і визначає точність обробки. Це дозволило по-новому розкрити технологічні можливості процесу виходжування в плані підвищення точності і продуктивності обробки та визначити оптимальні умови обробки.

#### ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ЭТАПЕ ВЫХАЖИВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Бережной Р.А.

В работе приведены результаты исследований закономерностей съема припуска и формирования точности обработки на этапе выхаживания при шлифовании в условиях дискретного и постоянного характера контакта круга с обрабатываемой деталью. Показано, что характер контакта круга с деталью не влияет на изменение во времени производительности обработки и величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе и определяющего точность обработки. Это позволило по-новому раскрыть технологические возможности процесса выхаживания в плане повышения точности и производительности обработки и определить оптимальные условия обработки.

#### IMPROVING THE ACCURACY AND PRODUCTIVITY OF MACHINING ON STAGE OF DEAD-STOP GRINDING

Berezhnoy R.A.

The paper presents the results of studies of regularities of stock removal and the formation of the accuracy of machining at the stage of dead-stop grinding in a discrete and continuous kind of the contact of wheel with workpiece being machined. It is shown that the kind of the contact of wheel with detail does not affect the changes of machining productivity in time and the value of elastic displacement, caused by the technological system and determine the accuracy of machining. This allowed for a fresh consideration to disclose the technological capabilities of dead-stop grinding to raise accuracy and productivity of machining and to determine the optimal machining conditions.

*Рецензент: д.т.н., доц. Гусєв В.В.*