

Ф.В.Новиков, докт.техн.наук, Ю.Г.Гуцаленко, С.А.Дитиненко,  
Харьков, Украина

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ПРОДОЛЬНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ

*In the work the optimization is executed and the theoretical analysis of structure and parameters of operation of round external longitudinal deep grinding is carried out*

Вопросам оптимизации автоматизированных циклов шлифования в научно-технической литературе уделено большое внимание [1, 2]. Однако, полученные решения основаны на экспериментальных данных, что не позволяет в полной мере выявить потенциальные возможности создаваемых циклов шлифования с точки зрения обеспечения производительности и точности обработки. Поэтому целью работы является оптимизация структуры и параметров операции круглого наружного продольного глубинного шлифования.

Проведем анализ путей повышения производительности обработки на операции круглого наружного продольного шлифования цилиндрической детали диаметром  $D_{дет}$  и длиной  $l_{дет}$  с учетом ограничения по точности обработки (точности размера), обусловленной упругими деформациями элементов технологической системы. В общем виде фактическая производительность обработки  $Q_f$  определяется зависимостью:

$$Q_f = \frac{v}{\tau}, \quad (1)$$

где  $v = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot (П - \delta)$  - объем материала, который снимается за время  $\tau$  с цилиндрической детали при шлифовании,  $м^3$ ;  $П$  - величина снимаемого припуска,  $м$ ;  $\delta$  - величина упругого перемещения, определяющая точность размера обрабатываемой детали,  $м$ ;  $\tau = n \cdot \tau_0$  - время шлифования,  $с$ ;  $n = П / t$  - количество продольных ходов круга;  $t$  - глубина шлифования,  $м$ ;  $\tau_0 = l_{дет} / S_{прод}$  - время одного продольного хода круга,  $с$ ;  $S_{прод}$  - скорость продольной подачи,  $м/с$ .

После несложных преобразований зависимость (1) опишется

$$Q_f = Q_{ном} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{П}\right), \quad (2)$$

где  $Q_{ном} = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot S_{прод}$  - номинальная производительность обработки,  $м^3/с$ .

Из зависимости (2) следует, что фактическая производительность обработки  $Q_f$  всегда меньше номинальной производительности обработки  $Q_{ном}$  в связи с возникновением в технологической системе упругого перемещения  $\delta$ . Величина  $\delta$  в общем случае зависит от жесткости системы, режущей способности шлифовального круга, режимов шлифования и других условий обработки и может изменяться в пределах  $(0...1) \cdot П$ . Соответственно фактическая произ-

водительность обработки  $Q_\phi$  может изменяться в пределах  $(0...1) \cdot Q_{\text{ном}}$ .

Таким образом показано, что основным путем увеличения  $Q_\phi$  необходимо рассматривать уменьшение величины упругого перемещения за счет изменения условий обработки. Величина определяет точность размера обработок. Она задается на чертеже обрабатываемой детали и по величине значительно меньше снимаемого припуска  $\Pi$ . С учетом этого в зависимости (2) вторым слагаемым можно пренебречь, в результате чего приходим к зависимости  $Q_\phi \approx Q_{\text{ном}}$ . В данном случае номинальная производительность обработки связана определенным образом с величиной  $\delta$ . Для установления этой связи воспользуемся известным теоретическим решением, приведенным в работах Новикова Ф.В. [3, 4]:

$$\delta = \frac{P_r}{c} = \frac{P_t}{c \cdot K_w} = \frac{\sigma \cdot S_{\text{рез}}}{c \cdot K_w} = \frac{\sigma \cdot Q_\phi}{c \cdot K_w \cdot V_{\text{сп}}} \approx \frac{\sigma \cdot Q_{\text{ном}}}{c \cdot K_w \cdot V_{\text{сп}}}, \quad (3)$$

где  $P_r$ ,  $P_t$  - соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при шлифовании, Н;  $c$  - приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $K_w = P_t / P_r$  - коэффициент шлифования;  $\sigma$  - условное напряжение резания при шлифовании, Н/м<sup>2</sup>;  $V_{\text{сп}}$  - скорость круга, м/с.

Из зависимости (3) следует, что величина  $\sigma$  и номинальная производительность обработки  $Q_{\text{ном}}$  связаны линейной зависимостью. Следовательно, уменьшение величины  $\sigma$  требует пропорционального уменьшения  $Q_{\text{ном}}$  и соответственно  $Q_\phi$ , что не эффективно, в особенности при съеме больших припусков.

Что же надо сделать, чтобы повысить производительность обработки, обеспечивая при этом требуемую точность обработки? Вполне очевидным является решение, связанное с выполнением операции круглого наружного продольного шлифования в два перехода. На первом переходе производится черновое шлифование с максимально возможной производительностью обработки  $Q_{\text{ном}}$ . На втором переходе - чистовое шлифование с меньшей производительностью обработки  $Q_{\text{ном}}$ , определяемой в соответствии с зависимостью (3) и обеспечивающей заданную точность обработки  $\sigma$ . Величина снимаемого припуска на втором переходе равна величине упругого перемещения, возникающего на первом переходе шлифования.

Существуют операции шлифования, включающие несколько переходов. На практике широкое применение получили операции шлифования, включающие переход чернового шлифования и переход выхаживания, т.е. шлифование с отключенной поперечной подачей станка. На данном переходе процесс съема припуска происходит за счет упругих перемещений в технологической системе, которые возникли на переходе чернового шлифования.

Средняя фактическая производительность рассмотренной операции круглого наружного продольного шлифования определяется зависимостью

$$Q_{\text{сп}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ном}} \cdot l_{\text{ном}} \cdot \Pi}{(\tau_1 + \tau_2)}, \quad (4)$$

где  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  - соответственно продолжительность первого и второго переходов

операции шлифования, с;  $\Pi$  - величина снимаемого припуска, м.

Преобразуем зависимость (4):

$$\frac{\Pi}{(\tau_1 + \tau_2)} = \frac{\Pi}{\tau_1 \cdot \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)} = \frac{S_{ном}}{(1 + \alpha)}, \quad (5)$$

где  $S_{ном}$  - номинальная поперечная подача на переходе черного шлифования, м/с; -  $\alpha = \tau_2 / \tau_1$ .

Тогда

$$Q_{ср} = \frac{Q_{ном}}{(1 + \alpha)}, \quad (6)$$

где  $Q_{ном}$  - номинальная производительность обработки на переходе черного шлифования, м<sup>3</sup>/с.

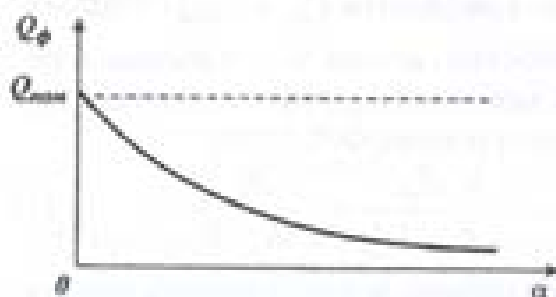


Рис. 1. Зависимость  $Q_{ср}$  от  $\alpha$ .

Из зависимости (6) следует, что средняя фактическая производительность операции шлифования  $Q_{ср}$  всегда меньше номинальной производительности обработки на переходе черного шлифования  $Q_{ном}$ . Чем больше коэффициент  $\alpha$ , тем меньше  $Q_{ср}$ , рис. 1. Зависимость (6) можно представить в виде:

$$\frac{Q_{ср}}{Q_{ном}} = \frac{1}{(1 + \alpha)}. \quad (7)$$

Таблица 1

Расчетные значения отношения  $Q_{ср} / Q_{ном}$

$\alpha$	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
$Q_{ср} / Q_{ном}$	0,67	0,50	0,33	0,17	0,09

При увеличении коэффициента  $\alpha$  в 20 раз (с 0,5 до 10,0) отношение  $Q_{ср} / Q_{ном}$  уменьшилось в 7,45 раз (с 0,67 до 0,09), табл. 1. Определим минимальное значение  $\alpha$ , начиная с которого отношение  $Q_{ср} / Q_{ном}$  с достаточной для практики точностью можно выразить зависимостью

$$\frac{Q_{ср}}{Q_{ном}} = \frac{1}{\alpha}. \quad (8)$$

Для этого определим значения отношения  $\alpha / (1 + \alpha)$ .

Таблица 2

Расчетные значения отношения  $\alpha / (1 + \alpha)$

$\alpha$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0
$\alpha / (1 + \alpha)$	0,33	0,5	0,67	0,75	0,8	0,83	0,1

Исходя из табл. 2, начиная с  $\alpha = 4,0$ , отличие значений  $\alpha$  и  $(1 + \alpha)$  не превышает 20%, что позволяет в первом приближении для расчетов использовать зависимость (8), которая принимает вид

$$\frac{Q_{\text{сп}}}{Q_{\text{max}}} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (9)$$

Согласно зависимости (9) отношение  $Q_{\text{сп}}/Q_{\text{max}}$  пропорционально отношению  $\tau_1/\tau_2$ . Проведем оптимизацию и теоретический анализ операции круглого наружного продольного глубинного (однопроходного) шлифования. Продолжительность  $\tau_1$  перехода черного шлифования в этом случае определится:

$$\tau_1 = \frac{l_{\text{дет}}}{S_{\text{прод}}} \quad (10)$$

Выразим скорость продольной подачи  $S_{\text{прод}}$  через величину упругого перемещения  $y = \Pi_2$ , возникающего на переходе глубинного шлифования. Здесь  $\Pi_2$  – припуск, удаляемый на переходе выхаживания. Для этого воспользуемся зависимостью (3), выразив в ней производительность обработки в виде  $Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t$ . Фактическая глубина шлифования при однопроходном глубинном шлифровании равна  $t = \Pi - \Pi_2$ , где  $\Pi$  – припуск, снимаемый на операции шлифования, включающей переходы глубинного шлифования и выхаживания. Тогда, исходя из зависимости (3), скорость продольной подачи  $S_{\text{прод}}$  может быть выражена через величину упругого перемещения  $y = \Pi_2$ :

$$S_{\text{прод}} = \frac{c \cdot K_w \cdot V_{\text{сп}} \cdot \Pi_2}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot (\Pi - \Pi_2)} \quad (11)$$

Соответственно время  $\tau_1$  определится подстановкой зависимости (11) в зависимость (10) с учетом площади обрабатываемой поверхности  $F = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}$ :

$$\tau_1 = \frac{F \cdot \sigma \cdot (\Pi - \Pi_2)}{c \cdot K_w \cdot V_{\text{сп}} \cdot \Pi_2} \quad (12)$$

Продолжительность  $\tau_2$  перехода выхаживания определяется зависимостью [5]:

$$\tau_2 = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_w \cdot V_{\text{сп}}} \cdot (\ln \Pi_2 - \ln \delta_0) \quad (13)$$

где  $\delta_0$  – величина упругого перемещения, определяющая точность размера обрабатываемой детали (после перехода выхаживания), м;

Суммируя параметры  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , имеем

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{F \cdot \sigma}{c \cdot K_w \cdot V_{\text{сп}}} \cdot \left[ \frac{\Pi - \Pi_2}{\Pi_2} + (\ln \Pi_2 - \ln \delta_0) \right] \quad (14)$$

Как видим, функция  $(\tau_1 + \tau_2)$  имеет экстремум от параметра  $\Pi_2$ . Проведем исследование функции  $(\tau_1 + \tau_2)$  на экстремум. Для этого возьмем первую производную от функции  $(\tau_1 + \tau_2)$  по параметру  $\Pi_2$ :

$$(\tau_1 + \tau_2)_{\Pi_2}' = \frac{F \cdot \sigma}{c \cdot K_w \cdot V_{sp}} \cdot \left( -\frac{\Pi}{\Pi_2^2} + \frac{1}{\Pi_2} \right). \quad (15)$$

Приравняем полученное выражение нулю и определим экстремальное значение параметра  $\Pi_2$ , которое, как установлено, равно  $\Pi_2 = \Pi$ . Следовательно, экстремальное значение параметра  $\Pi_2$  равно величине снимаемого припуска  $\Pi$ .

Вторая производная функции  $(\tau_1 + \tau_2)$  по параметру  $\Pi_2$  равна:

$$(\tau_1 + \tau_2)_{\Pi_2}'' = \frac{F \cdot \sigma}{c \cdot K_w \cdot V_{sp}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \Pi}{\Pi_2^3} - \frac{1}{\Pi_2^2} \right).$$

Значение второй производной  $(\tau_1 + \tau_2)_{\Pi_2}''$  в точке экстремума  $\Pi_2 = \Pi$ :

$$(\tau_1 + \tau_2)_{\Pi_2}'' = \frac{F \cdot \sigma}{c \cdot K_w \cdot V_{sp}} \cdot \left( \frac{2}{\Pi^2} - \frac{1}{\Pi^2} \right) = \frac{F \cdot \sigma}{c \cdot K_w \cdot V_{sp}} \cdot \frac{1}{\Pi}.$$

Как видим, вторая производная функции  $(\tau_1 + \tau_2)$  в точке экстремума положительна, следовательно, имеет место минимум функции  $(\tau_1 + \tau_2)$ . Поэтому, с точки зрения уменьшения общего времени рассматриваемой операции шлифования (или увеличения производительности обработки) целесообразно исключить из операции переход чернового шлифования, т.е. съём всего припуска производить лишь на переходе выхаживания, создавая в технологической системе начальный натяг, равный величине снимаемого припуска  $\Pi$ . Таким образом, оптимальной по структуре операцией круглого наружного продольного глубинного шлифования, обеспечивающей максимально возможную производительность обработки с учетом ограничения по точности обработки, является операция шлифования, включающая лишь переход выхаживания. Полученное решение аналогично решению для круглого наружного продольного многопроходного шлифования, приведенного в работе [6].

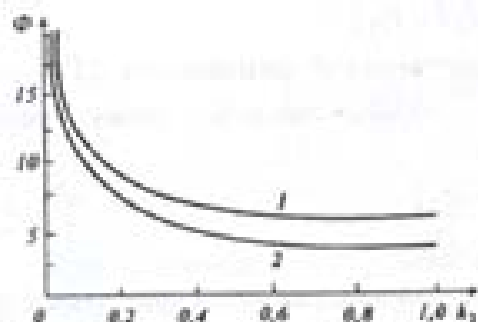


Рис. 2. Изменение безразмерной функции  $\Phi$  от безразмерного коэффициента  $k_2$  для многопроходного (1) и глубинного (2) шлифования.

Для анализа зависимости (14) преобразуем с учетом  $\Pi_2 = k_2 \cdot \Pi$  и  $\delta_0 = k_0 \cdot \Pi$ :

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{F \cdot \sigma}{c \cdot K_w \cdot V_{sp}} \cdot \left[ \frac{1}{k_2} - 1 + \ln \left( \frac{k_2}{k_0} \right) \right]. \quad (16)$$

Зависимость (16), полученная для операции глубинного шлифования, и аналогичная зависимость, полученная для операции многопроходного шлифования и приведенная в работе [6], с учетом  $F = \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l_{\text{дем}}$ , отличаются лишь тем, что зависимость (16) в квадратных скобках содержит дополнительное слагаемое (-1). Это свидетельствует о том, что продолжительность операции гл-

бинного шлифования меньше (рис. 2), где  $\Phi = \left[ \frac{1}{k_2} + \ln \left( \frac{k_2}{k_0} \right) \right]$  – безразмерная функция, входящая в зависимость (16).

Таким образом, в работе выполнена оптимизация и проведен теоретический анализ структуры и параметров операции круглого наружного продольного глубинного шлифования. Оптимальной по структуре операцией, обеспечивающей максимально возможную производительность обработки с учетом ограничения по точности обработки, является операция шлифования, включающая лишь переход выхаживания.

Список литературы: 1. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. 2. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с. 3. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф. В. Нозиков, Г.В. Нозиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОНПУ, 1999. – 450 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Нозикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 5. Дитиненко С.А. Параметрическая оптимизация цикла круглого наружного продольного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ, 2004. – Вып. 26. С. 61-70. 6. Нозиков Ф.В., Дитиненко С.А. Оптимизация структуры и параметров операции круглого наружного алмазного шлифования твердосплавных поверхностей // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХП", 2004. – Вып. 2(9). С. 155-160.

*Поступила в редакцию 01.06.05*