

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

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО НАРУЖНОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При разработке технологических процессов круглого наружного алмазного шлифования твердосплавных изделий постоянно возникают задачи обеспечения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничения по точности обработки. Эффективным направлением решения данной задачи является применение автоматизированных циклов круглого наружного шлифования [1, 2]. Однако, они разработаны для условий абразивного шлифования, которое, как известно, по физической сущности значительно отличается от алмазного шлифования, в особенности шлифования алмазными кругами на металлических связках с их электроэрозионной правкой. Поэтому для эффективного применения циклов шлифования алмазными кругами необходимо изучить особенности формирования циклов, т.е., по сути, условия формирования переходов операций шлифования. Это требует решения задачи оптимизации структуры и параметров операции круглого наружного алмазного шлифования твердосплавных поверхностей.

В настоящей работе приведено теоретическое решение данной задачи. В качестве целевой функции при выполнении оптимизационных расчетов рассматривается производительность операции шлифования, а в качестве технических ограничений – точность обработки, обусловленная упругими перемещениями в технологической системе.

Для решения задачи воспользуемся аналитической зависимостью для определения основного времени операции шлифования (включая переходы чернового шлифования и выхаживания), приведенной в работе [3]:

$$\begin{aligned} (\tau_1 + \tau_2) &= \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет}}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 \cdot \left[\frac{1}{k_2} + z \cdot \ln \left(\frac{k_2}{k_0} \right) \right] = \\ &= \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет}}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 \cdot \Phi, \end{aligned} \quad (1)$$

где τ_1, τ_2 – соответственно время обработки на переходах чернового шлифования и выхаживания, с; $D_{дет}, l_{дет}$ – соответственно диаметр и длина обрабатываемой цилиндрической детали, м; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{ш}$ – коэффициент шлифования, равный отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания; $k_2 = \Pi_2 / \Pi$; $k_0 = \delta_0 / \Pi$; Π – припуск, удаляемый на операции шлифования, м; Π_2 – припуск, удаляемый на переходе выхаживания, м; δ_0 – заданная точность размера обработки, м;

$z = \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}\right)_2 / \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}\right)_1$ – безразмерный коэффициент, $z \geq 1$ ($z = 1$ – для “острого”

алмазного круга, $z > 1$ – для затупленного алмазного круга); $z = \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}\right)_2, \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}\right)_1$

– значения отношения $\sigma / K_{\text{ш}}$ на переходах выхаживания и черного шлифования;

$\Phi = \left[\frac{1}{k_2} + z \cdot \ln\left(\frac{k_2}{k_0}\right) \right]$ – безразмерная функция.

Для определения экстремального значения безразмерного коэффициента $k_2 = \Pi_2 / \Pi$ продифференцируем функцию $(\tau_1 + \tau_2)$ по k_2 :

$$(\tau_1 + \tau_2)_{k_2}' = \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}}{c \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}\right)_1 \cdot \left(-\frac{1}{k_2^2} + \frac{z}{k_2}\right). \quad (2)$$

Приравнявая полученное выражение к нулю, определим экстремальное значение коэффициента k_2 :

$$k_{2\text{экстр}} = \frac{1}{z}. \quad (3)$$

Установим характер экстремума функции времени $(\tau_1 + \tau_2)$, для чего определим вторую производную данной функции по k_2 :

$$(\tau_1 + \tau_2)_{k_2}'' = \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}}{c \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}\right)_1 \cdot \left(\frac{2}{k_2^3} - \frac{z}{k_2^2}\right). \quad (4)$$

В точке экстремума, определяемого зависимостью (3), вторая производная функции $(\tau_1 + \tau_2)$

$$(\tau_1 + \tau_2)_{k_2}'' = \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}}{c \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}\right)_1 \cdot (2z^3 - z^3) > 0$$

положительна. Следовательно, имеет место минимум функции $(\tau_1 + \tau_2)$.

Минимальное значение функции $(\tau_1 + \tau_2)$ определим, подставляя в зависимость (1) экстремальное значение $k_2 = \frac{1}{z}$:

$$(\tau_1 + \tau_2)_{\text{min}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot l_{\text{дет}}}{c \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}\right)_1 \cdot z \cdot \left[1 + \ln\left(\frac{1}{z \cdot k_0}\right) \right]. \quad (5)$$

На рис. 1 показан характер изменения экстремальных значений k_2 в зависимости от коэффициента z . Как видим, с увеличением z коэффициент k_2 уменьшается. Следовательно, лишь при значении $z = 1$ исследуемая операция шлифования не содержит перехода черного шлифования, т.к. $\Pi_1 = 0$, а $\Pi_2 = \Pi$, где Π_1 – припуск, удаляемый на переходе черного шлифования. Во всех остальных случаях, т.е. при $z > 1$, операция шлифования должна включать переход черного шлифования. При этом, чем значительнее расхождение значений $\sigma / K_{\text{ш}}$ на переходах черного шлифования и выхаживания (чем больше

коэффициент z), тем меньше должен быть коэффициент k_2 и соответственно припуск $П_2$, удаляемый на переходе выхаживания.

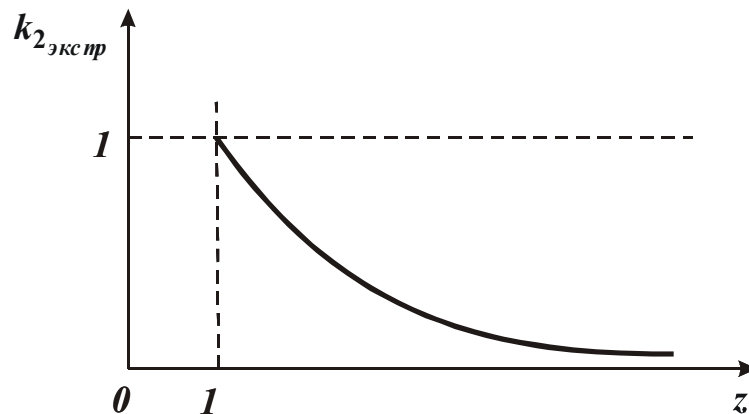


Рис. 1. Изменение безразмерного коэффициента $k_{2экстр}$ от безразмерного коэффициента z .

Для удобства анализа функцию $(\tau_1 + \tau_2)_{min}$, описываемую зависимостью (5), представим в виде:

$$(\tau_1 + \tau_2)_{min} = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет}}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 \cdot \Phi_{min},$$

где $\Phi_{min} = z \cdot \left[1 + \ln \left(\frac{1}{z \cdot k_0} \right) \right]$ - безразмерная функция.

На рис. 2 показан характер изменения безразмерной функции Φ , определяющей функцию $(\tau_1 + \tau_2)$, в зависимости от коэффициента k_2 . С увеличением z ($z_1 = 1, z_2 = 2, z_3 = 3, z_4 = 4$) минимум безразмерной функции Φ_{min} увеличивается и смещается в область меньших значений коэффициента k_2 . Однако, такой характер изменения минимума безразмерной функции Φ_{min} имеет место в определенном диапазоне изменения коэффициента k_2 .

Как следует из зависимости (5), в общем случае минимум функции $(\tau_1 + \tau_2)$ и соответственно безразмерной функции Φ изменяется по экстремальной зависимости с увеличением коэффициента z .

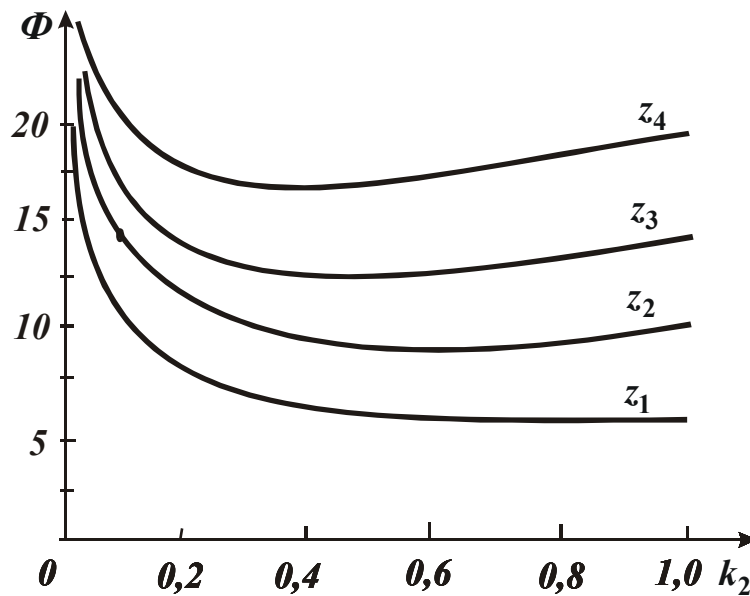


Рис. 2. Изменение безразмерной функции Φ от безразмерного коэффициента k_2 .

В табл. 1 приведены расчетные значения безразмерной функции Φ для $k_0 = 0,01$, соответствующие данным, приведенным на рис. 2.

Таблица 1 – Расчетные значения безразмерной функции Φ для $k_0 = 0,01$

k_2	1,0	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
$\Phi (z=1)$	5,6	5,9	6,7	8,0	12,3	21,7	50,7	100
$\Phi (z=2)$	10,2	9,8	10,1	11,0	14,6	23,4	51,4	100
$\Phi (z=3)$	14,8	13,7	13,5	14,0	16,9	24,8	52,1	100
$\Phi (z=4)$	19,4	17,6	16,9	17,0	19,2	26,8	52,8	100

Для определения экстремума функции $(\tau_1 + \tau_2)_{min}$ продифференцируем ее по коэффициенту z

$$(\tau_1 + \tau_2)'_{min z} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l_{dem}}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{uu}} \right)_1 \cdot \left[1 + \ln \left(\frac{1}{z \cdot k_0} \right) - 1 \right]. \quad (6)$$

Приравнявая к нулю полученное выражение (6), определим экстремальное значение коэффициента z :

$$z_{экстр} = \frac{1}{k_0}. \quad (7)$$

Возьмем вторую производную от функции $(\tau_1 + \tau_2)_{min}$ по коэффициенту z :

$$(\tau_1 + \tau_2)''_{min z} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l_{dem}}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{uu}} \right)_1 \cdot \left(-\frac{1}{z} \right).$$

Подставляя зависимость (7), видим, что вторая производная в точке экстремума отрицательная величина. Следовательно, имеет место максимум функции $(\tau_1 + \tau_2)$. Экстремальное (максимальное) значение функции $(\tau_1 + \tau_2)_{min}$, определяемой зависимостью (5), с учетом выражения (7), определится:

$$(\tau_1 + \tau_2)_{min_{экстр}} = \frac{\pi \cdot D_{дем} \cdot l_{дем}}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{uu}} \right)_1 \cdot \frac{1}{k_0}.$$

Соответственно экстремальное (максимальное) значение безразмерной функции Φ_{min} равно

$$\Phi_{min} = \frac{1}{k_0}.$$

В табл. 2 приведены расчетные значения функции Φ_{min} в зависимости от коэффициента z .

Таблица 2 – Расчетные значения функции Φ_{min} для $k_0 = 0,01$

z	1	2	3	4	5	100
Φ_{min}	5,6	9,8	13,2	16,8	20	100
$k_{2_{экстр}}$	1,0	0,5	0,33	0,25	0,2	0,01

Как видим, с увеличением коэффициента z функция Φ_{min} увеличивается. При $z = 100$ имеет место экстремум (максимум) функции Φ_{min} , исходя из зависимости (7). В данной таблице приведены также экстремальные значения $k_{2_{экстр}}$, рассчитанные по зависимости (3).

График изменения безразмерной функции Φ_{min} от коэффициента z , построенный на основе расчетных данных, приведенных в табл. 2, показан на рис. 3. Поскольку коэффициент z связан с экстремальным значением коэффициента $k_{2_{экстр}}$ в соответствии с зависимостью (3), зависимость (7) можно представить:

$$k_{2_{экстр}} = k_0. \quad (8)$$

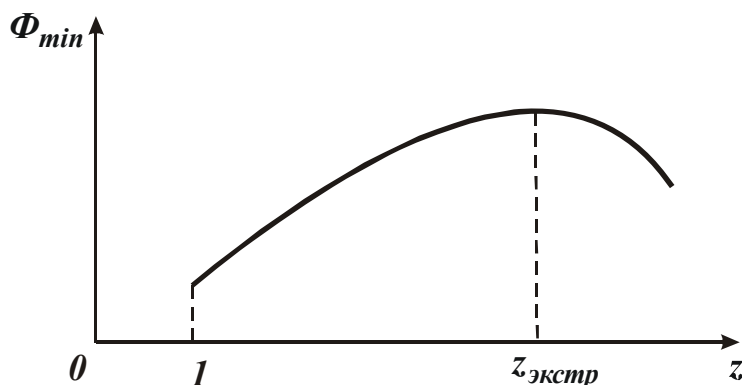


Рис. 3. Изменение безразмерной функции Φ_{min} от безразмерного коэффициента z .

Соответственно характер изменения безразмерной функции Φ_{min} от коэффициента k_2 графически примет вид, показанный на рис. 4. Как видим, мак-

симум функции достигается при небольших значениях коэффициента k_2 , т.к. $k_2 \gg k_0$. Следовательно, практически во всем рабочем диапазоне изменения коэффициента k_2 безразмерная функция Φ_{min} принимает большие значения, чем при $k_2=1$ ($z=1$). Из этого можно заключить, что оптимальной по структуре операцией шлифования является операция, в которой переход черного шлифования отсутствует.

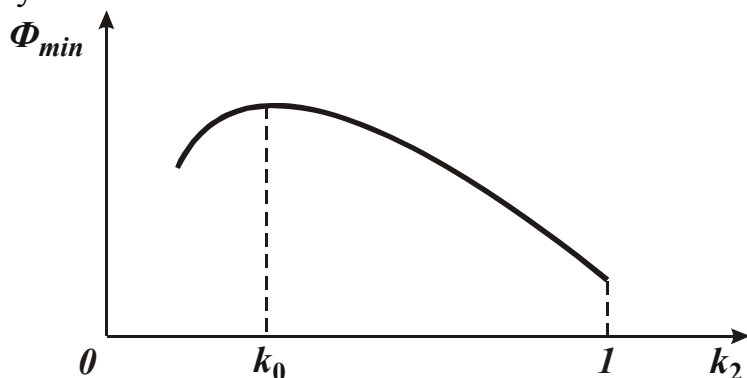


Рис. 4. Изменение безразмерной функции Φ_{min} от безразмерного коэффициента k_2 .

Рассмотрим условия реализации оптимальной по структуре операции шлифования. Очевидно, основным условием следует рассматривать обеспечение высокой режущей способности алмазного круга, когда $z \rightarrow 1$. Это возможно при $\eta = \frac{x}{x + H_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{H_{max}}{x}} \rightarrow 0$, где η – безразмерный коэффициент, учи-

тывающий степень затупления зерен круга, изменяется в пределах $0 \dots 1$ [4]; x – условная величина линейного износа зерна, максимально выступающего над уровнем связки круга, м; H_{max} – максимальная толщина среза отдельным зерном, м.

Выполнить данное условие можно при $x \rightarrow 0$ и $H_{max} > x$. В первом случае необходимо обеспечить поддержание на рабочей поверхности алмазного круга острого режущего рельефа, своевременно удаляя с рабочей поверхности круга затупившиеся зерна. Это реализуется за счет применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках.

Во втором случае необходимо шлифование производить с увеличенной толщиной среза H_{max} (увеличенной производительностью обработки). Но для этого необходимо обеспечить прочное удержание зерен в связке круга и их увеличенное выступание над уровнем связки, что достигается за счет применения алмазных кругов на металлических связках и непрерывной или периодической электроэрозионной правки.

Список литературы: 1. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учебн. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новигов, Г.В. Новигов, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ,

1999. – 450 с. **2.** *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. **3.** *Дитиненко С.А.* Параметрическая оптимизация цикла круглого наружного продольного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. “Технічний сервіс АПК, техніка та технології сільськогосподарському машинобудуванні”. – Харків: ХДТУСГ, 2004. – Вип. 26. – С. 61-70. **4.** Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова.* В десяти томах. – Т. 4. ”Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов ” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.

Поступила в редколлегию 17.05.04