

СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛА КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук

(Харьковский Национальный экономический университет)

В работе приведены результаты структурной и параметрической оптимизации цикла круглого наружного шлифования.

Решение задач структурной и параметрической оптимизации процесса шлифования имеет чрезвычайно большое практическое значение при создании новых эффективных технологических процессов обработки [1-4]. В нашей работе [5] приведено решение задачи оптимизации структуры и параметров цикла круглого наружного шлифования. В качестве исходного принят цикл круглого наружного шлифования, включающий этап чернового шлифования и этап выхаживания. Упругие перемещения y , возникающие на этапе чернового шлифования, рассмотрены с позиции установившегося процесса шлифования и описаны упрощенной зависимостью:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн}}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot Q_{ф}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \approx \frac{\sigma \cdot Q_0}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}, \quad (1)$$

где P_y , P_z - соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при шлифовании, Н; c - приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; $K_{ш} = P_z / P_y$ - коэффициент шлифования; σ - условное напряжение резания при шлифовании, Н/м²; $V_{кр}$ - скорость круга, м/с; $S_{мгн}$ - мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²; $Q_{ф}$, Q_0 - соответственно фактическая и номинальная производительность обработки, м³/с.

В действительности, упругие перемещения, возникающие на этапе чернового шлифования, необходимо рассматривать с позиции неустановившегося процесса шлифования и описывать аналитической зависимостью

$$y = y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}} \right), \quad (2)$$

$$y_{уст} = \frac{\sigma}{K_{ш}} \cdot \frac{Q_0}{V_{кр}} \cdot \frac{1}{c}, \quad (3)$$

где Π - текущее значение снимаемого припуска.

На этапе выхаживания упругие перемещения описываются зависимостью:

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}, \quad (4)$$

где $D_{дет}, l_{дет}$ - соответственно диаметр и длина обрабатываемой детали, м; y_0 - начальный натяг в технологической системе, м.

Поэтому целью работы является уточнение приведенного в работе [5] решения задачи оптимизации структуры и параметров цикла круглого наружного шлифования на основе использования более точных аналитических зависимостей (2) и (4), описывающих упругие перемещения, возникающие на этапе чернового шлифования (при врезании шлифовального круга в обрабатываемую деталь) и на этапе выхаживания.

Основное время цикла круглого наружного шлифования τ представим в виде суммы двух слагаемых

$$\tau = \tau_1 + \tau_2, \quad (5)$$

где τ_1, τ_2 - соответственно основное время этапа чернового шлифования и этапа выхаживания, с.

Предположим, что на этапе чернового шлифования происходит врезание со скоростью поперечной подачи $S_{нон}$ шлифовального круга в обрабатываемую деталь на всю величину срезаемого припуска Π . Тогда

$$\tau_1 = \frac{\Pi}{S_{нон}}. \quad (6)$$

Основное время этапа выхаживания τ_2 определим из зависимости (4), рассматривая ее в виде

$$y = \delta_0 = \Pi_2 \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau_2)}, \quad (7)$$

откуда

$$\tau_2 = -\frac{1}{\bar{\beta}} \cdot \ln \frac{\delta_0}{\Pi_2} = \frac{1}{\bar{\beta}} \cdot \ln \frac{\Pi_2}{\delta_0}, \quad (8)$$

где δ_0 - точность размера обрабатываемой детали, м; Π_2 - величина припуска, формируемого на этапе чернового шлифования и удаляемого на этапе выхаживания, м;

$$\bar{\beta} = \frac{V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma};$$

$V_{кр}$ - скорость круга, м/с; $K_{ш}$ - коэффициент шлифования, равный отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания; σ - условное напряжение резания, Н/м²; c - приведенная жесткость технологической системы, Н/м; $D_{дет}, l_{дет}$ - соответственно диаметр и длина обрабатываемой детали, м.

Подставляя зависимости (6) и (8) в зависимость (5), имеем

$$\tau = \frac{\Pi}{S_{нон}} + \frac{1}{\bar{\beta}} \cdot \ln \frac{\Pi_2}{\delta_0}. \quad (9)$$

Зависимость (9) содержит два неизвестных параметра $S_{нон}$ и Π_2 . Для решения оптимизационных задач необходимо прийти к одному неизвестному параметру. Для этого рассмотрим этап чернового шлифования. Зависимость (2) представим в виде

$$y = \Pi_2 = y_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}} \right). \quad (10)$$

Величина $y_{уст}$ описывается зависимостью (3). Номинальная производительность обработки Q_0 определяется: $Q_0 = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot S_{non}$.

Тогда зависимость (2.12) можно представить в виде

$$y_{уст} = A_1 \cdot S_{non}, \quad (11)$$

где $A_1 = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}{c \cdot V_{кр} \cdot K_{ш}}$.

С учетом зависимости (11) зависимость (10) выразится

$$\Pi_2 = A_1 \cdot S_{non} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi}{A_1 \cdot S_{non}}} \right). \quad (12)$$

Подставим зависимость (12) в (8)

$$\tau_2 = \frac{1}{\beta} \cdot \ln \left[\frac{A_1 \cdot S_{non}}{\delta_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi}{A_1 \cdot S_{non}}} \right) \right]. \quad (13)$$

Подставим зависимости (6) и (13) в зависимость (5)

$$\tau = \frac{\Pi}{S_{non}} + \frac{1}{\beta} \cdot \ln \left[\frac{A_1 \cdot S_{non}}{\delta_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi}{A_1 \cdot S_{non}}} \right) \right]. \quad (14)$$

Из полученной зависимости (14) нетрудно видеть, что с увеличением скорости поперечной подачи S_{non} основное время цикла шлифования τ за счет первого слагаемого первоначально будет уменьшаться, а затем – за счет второго слагаемого – будет увеличиваться, проходя точку минимума. Это обусловлено более интенсивным изменением первого слагаемого при изменении S_{non} .

Определим экстремальное значение S_{non} . Для этого подчиним функцию τ , описываемую зависимостью (14), необходимому условию экстремума: $\tau'_{S_{non}} = 0$. В результате получено

$$\tau'_{S_{non}} = -\frac{\Pi}{S_{non}^2} + \frac{1}{\beta \cdot S_{non}} - \frac{\Pi}{\beta \cdot A_1 \cdot S_{non}^2} \cdot \frac{1}{\left(e^{\frac{\Pi}{A_1 \cdot S_{non}}} - 1 \right)} = 0 \quad (15)$$

или

$$\left(e^{\frac{\Pi}{A_1 \cdot S_{non}}} - 1 \right) = \frac{\Pi}{A_1 \cdot (S_{non} - \beta \cdot \Pi)}. \quad (16)$$

Уравнение (16) выполняется при $S_{non} \rightarrow \infty$. В этом случае левая и правая части уравнения равны нулю. Следовательно, экстремум (минимум) функции τ достигается при условии $S_{non} \rightarrow \infty$, рис. 1. Это связано, как отмечалось выше, с более интенсивным изменением первого слагаемого зависимости (14) при изменении S_{non} во всем возможном диапазоне $(0; \infty)$.

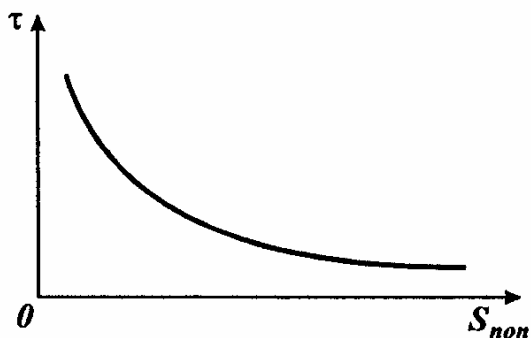


Рис. 1. Зависимость τ от S_{non} .

Подставляя значение $S_{non} \rightarrow \infty$ в зависимость (10), видим, что величина упругого перемещения y стремится к бесконечности ($y \rightarrow \infty$), т.е. съём обрабатываемого материала на этапе чернового шлифования отсутствует. Съём обрабатываемого материала возможен лишь на этапе выхаживания. Этап чернового шлифования, реализуемый при $S_{non} \rightarrow \infty$, в данном случае служит для создания в технологической системе начального натяга величиной $\Pi_2 = \Pi$. Таким образом, оптимальным циклом круглого наружного шлифования является цикл, включающий этап ускоренного врезания шлифовального круга в обрабатываемую деталь (для создания начального натяга в технологической системе) и этап выхаживания, на котором происходит съём всего припуска.

Основное время оптимального цикла шлифования τ определяется временем этапа выхаживания τ_2 , которое описывается зависимостью (8). Тогда

$$\tau = \tau_2 = \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{\Pi_2}{\delta_0}. \quad (17)$$

Полученное уточненное решение хорошо согласуется с приближенным аналогичным решением, приведенным в работе [5], что подтверждает достоверность выполненных расчетов.

Проведем оптимизацию структуры и параметров этапа выхаживания. При съеме относительно больших припусков реализовать оптимальный цикл круглого наружного шлифования, включающий один рабочий этап – этап выхаживания, весьма сложно. Возникает необходимость

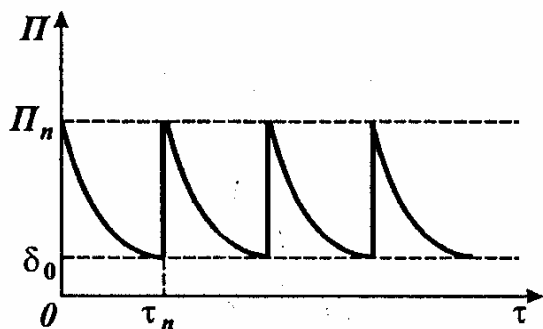


Рис. 2. Изменение величины снимаемого припуска во времени.

введения дополнительного этапа чернового шлифования, что, как показано выше, снижает производительность обработки при условии обеспечения требуемой точности обработки δ_0 . Для определения более эффективного варианта обработки оценим возможности съёма припуска величиной $\Pi = \Pi_n \cdot n$ за несколько

этапов выхаживания n (здесь Π_n - снимаемый на каждом этапе припуск), рис. 2. Для этого в пределах каждого этапа создается начальный натяг в технологической системе величиной Π_n и производится выхаживание до достижения требуемой точности обработки δ_0 .

Основное время этапа обработки τ_n определим из зависимости (7), представляя ее в виде

$$y = \delta_0 = \Pi_n \cdot e^{(-\beta \cdot \tau_n)}. \quad (18)$$

Откуда

$$\tau_n = \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{\Pi}{n \cdot \delta_0}. \quad (19)$$

Суммируя значения основного времени всех n этапов обработки, определим основное время цикла шлифования τ :

$$\tau = \sum_n \tau_n = n \cdot \tau_n = \frac{n}{\beta} \cdot \ln \frac{\Pi}{n \cdot \delta_0}. \quad (20)$$

Как видно, с изменением n функция τ изменяется по экстремальной зависимости. Для определения экстремального значения $n_{\text{экт}}$ продифференцируем функцию τ по n и первую производную приравняем нулю:

$$\tau'_n = \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{\Pi}{n \cdot \delta_0} - \frac{1}{\beta} = 0. \quad (21)$$

Откуда

$$n_{\text{экт}} = \frac{\Pi}{e \cdot \delta_0}, \quad (22)$$

где число $e = 2,72$.

Пример расчета. Для $\Pi / \delta_0 = 100$ имеем $n_{\text{экт}} = 37$.

Определим характер экстремума (наличие минимума или максимума) функции τ . Для этого установим знак второй производной функции τ от n :

$$\tau''_n = -\frac{1}{n} < 0. \quad (23)$$

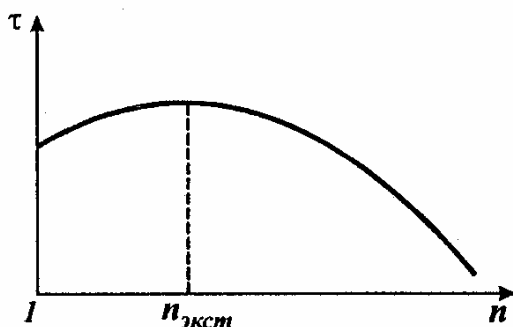


Рис. 3. Изменение функции τ от n .

Вторая производная τ''_n отрицательна в точке экстремума. Следовательно, имеет место максимум функции τ , рис. 3. Из этого вытекает, что обработку эффективно вести с $n=1$ или с $n > n_{\text{экт}}$. Первый случай предполагает реализацию оптимального цикла круглого на-

ружного шлифования, установленного выше.

При $n=1$ основное время цикла шлифования τ определяется зависимостью (17).

Определим значение функции τ в точке экстремума (максимума) при $n = n_{\text{экт}}$. Для этого подставим в зависимость (20) зависимость (22):

$$\tau = \frac{\Pi}{e \cdot \bar{\beta} \cdot \delta_0}. \quad (24)$$

Сравним значения τ при $n=1$ и при $n = n_{\text{экт}}$. Примем $\Pi / \delta_0 = 7,4$. Тогда, значение τ , определяемое по зависимости (17) при $n=1$, равно $\tau = 2 / \bar{\beta}$. Значение τ , определяемое по зависимости (24) при $n = n_{\text{экт}}$, равно $\tau = 2,72 / \bar{\beta}$. Следовательно, значение τ при $n=1$ меньше.

Экстремальное значение $n_{\text{экт}}$ равно 2,72 (с округлением до целого числа – равно 3). Увеличивая $n > n_{\text{экт}} = 3$, исходя из зависимости (20), можно уменьшить основное время обработки τ до значений менее $\tau = 2 / \bar{\beta}$ (при $n=1$).

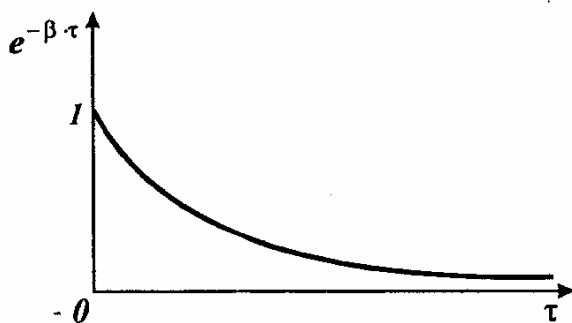


Рис. 4. Общий вид функции $e^{-\beta \cdot \tau}$.

Таким образом, теоретически обосновано важное решение, позволяющее повысить производительность обработки при условии обеспечения заданной точности обработки δ_0 . С физической точки зрения эффект уменьшения τ при $n > n_{\text{экт}}$ обусловлен различной интенсивностью изменения экспоненциальной функции $e^{-\beta \cdot \tau}$, рис. 4.

В начальный момент обработки (при небольших значениях времени τ) имеет место более интенсивное уменьшение экспоненциальной функции $e^{-\beta \cdot \tau}$. Следовательно, уменьшая отношение Π_n / δ_0 за счет увеличения числа этапов выхаживания n (рис. 9.9), можно реализовать участок более интенсивного уменьшения экспоненциальной функции ($\tau_n \rightarrow 0$), что приводит к уменьшению основного времени τ и, собственно, создает физический эффект обработки.

Таким образом в работе теоретически обоснованы наиболее оптимальные варианты цикла круглого наружного шлифования. Показаны их отличия от известных циклов, применяемых на практике.

Список литературы

1. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Изд. 2-е, перераб. доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с.
2. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
3. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 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.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
5. 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.

Анотація

Структурна і параметрична оптимізація циклу круглого зовнішнього шліфування

У роботі приведені результати структурної і параметричної оптимізації циклу круглого зовнішнього шліфування.

Abstract

Structural and parametrical optimization of the cycle of round external grinding

In work results of structural and parametrical optimization of a cycle of round external grinding are resulted.