

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ НАИМЕНЬШЕГО ОСНОВНОГО ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ РЕЗАНИЯ

**Новиков Ф.В., докт. техн. наук, проф., Кленов О.С.**  
(Харьковский национальный экономический университет,  
фирма “ДиМерус Инженеринг” г. Харьков)

Общеизвестно, что при шлифовании возникают значительные температуры резания, которые приводят к появлению на обрабатываемых поверхностях различного рода температурных дефектов (прижогов, микротрещин и т.д.) [1 – 3]. Традиционно основным путем уменьшения тепловой напряженности процесса шлифования является снижение режимов резания. Однако это ведет к уменьшению производительности обработки, что не всегда эффективно. Поэтому важно определить условия уменьшения температуры шлифования без снижения производительности обработки. В связи с этим целью работы является оптимизация структуры и параметров операций шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по температуре резания. В работах [4, 5] приведена аналитическая зависимость для определения температуры  $\theta$  при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью радиальной подачи  $V_{рез}$ :

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{рез} \cdot l_1}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $l_1$  – снимаемый припуск, м;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К.

Как видно, уменьшить температуру можно уменьшением параметров  $\sigma$ ,  $V_{рез}$  и  $l_1$ , т.е. повышением режущей способности круга, уменьшением производительности обработки и величины снимаемого припуска. Очевидно, обеспечить заданную температуру при одновременном увеличении производительности обработки можно уменьшением параметра  $l_1$ , выполняя операцию шлифования за несколько переходов и таким образом разбивая припуск по переходам. Для реализации данного подхода необходимо решить задачу минимизации основного времени обработки при условии, что в конце каждого перехода температура шлифования  $\theta$  равна заданной, а в начале каждого последующего перехода температура шлифования  $\theta$  может быть больше нуля. Иными словами, допускается, что к началу каждого перехода

обрабатываемый образец может полностью и не остыть. Для решения указанной выше задачи необходимо определить оптимальные значения скорости радиальной подачи обрабатываемого образца и величины снимаемых припусков на каждом переходе. Рассмотрим первоначально операцию шлифования, выполняемую в два перехода. Тогда основное время обработки  $\tau$  будет равно:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}}, \quad (2)$$

где  $\Pi_1, \Pi_2, V_{рез1}, V_{рез2}$  – величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на 1-ом и 2-ом переходах;  $\Pi_1 + \Pi_2 = \Pi$  – суммарный снимаемый припуск, м.

Температура в конце 1-го и 2-го переходов определяется зависимостями:

$$\begin{aligned} \theta &= \sigma \cdot V_{рез1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{рез1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} \right)}, \\ \theta &= \sigma \cdot V_{рез2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2)} = \sigma \cdot V_{рез2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} \right)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Разрешая зависимости относительно скоростей  $V_{рез1}$  и  $V_{рез2}$  с учетом (2), приходим к квадратному уравнению относительно неизвестной величины  $\sqrt{\tau}$ :

$$\tau - \frac{\Pi_2}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{\tau} - \frac{\Pi_1^2}{A} = 0, \quad (4)$$

где  $A = \left( \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \right) \cdot \left( \frac{\theta}{\sigma} \right)^2$ ;  $\left( \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} \right) = \tau$ .

Решение уравнения с учетом  $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$ :

$$\tau = \frac{1}{A} \cdot \left[ \frac{(\Pi - \Pi_1)}{2} + \sqrt{\frac{(\Pi - \Pi_1)^2}{4} + \Pi_1^2} \right]^2. \quad (5)$$

Величина  $\Pi_1$  неоднозначно влияет на  $\tau$ , т.е. имеет место экстремум функции  $\tau$  от величины  $\Pi_1$ . Для определения экстремального значения  $\Pi_1$  подчиним функцию  $\tau$  необходимому и достаточному условиям экстремума. В результате установлено, что функция  $\tau$  от величины  $\Pi_1$  имеет минимум (рис. 1,а). Экстремальные значения  $\Pi_1, \Pi_2$ , а также минимальное значение  $\tau$  равны:

$$\Pi_1 = 0,4 \cdot \Pi; \quad \Pi_2 = 0,6 \cdot \Pi; \quad \tau_{min} = \tau_1 + \tau_2 = (0,16 + 0,48) \cdot \frac{\Pi^2}{A} = 0,64 \cdot \frac{\Pi^2}{A}. \quad (6)$$

Основное время обработки  $\tau_1$  на первом переходе в 3 раза меньше основного времени обработки  $\tau_2$  на втором переходе и составляет 25% от основного времени обработки  $\tau$  на операции шлифования, рис. 1,б. Как следует из рис. 2,а, скорость  $V_{рез1}$  в 2,5 раза, а скорость  $V_{рез2}$  в 1,25 раза больше скорости  $V_{рез}$  при шлифовании в один переход. Основное время обработки  $\tau$  при шлифовании в 3 перехода:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} + \frac{\Pi_3}{V_{рез3}}, \quad (7)$$

где  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  и  $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}$  – соответственно величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на первом, втором и третьем переходах;  $\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 = \Pi$  – суммарный снимаемый припуск, м.

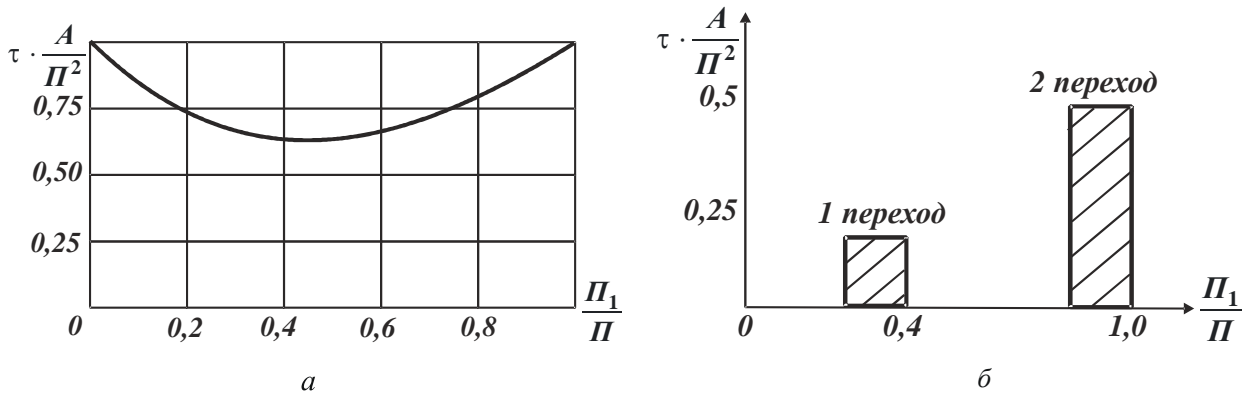


Рис. 1. Зависимость  $\tau \cdot A / \Pi^2$  от  $\Pi_1 / \Pi$  (а) и характер изменения величины  $\tau \cdot A / \Pi^2$  по переходам (б).

Температура шлифования  $\theta$  в конце первого, второго и третьего переходов определяется на основе зависимости (1):

$$\theta = \sigma \cdot V_{рез1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \tau_1} = \sigma \cdot V_{рез1} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} \right)}, \quad (8)$$

$$\theta = \sigma \cdot V_{рез2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2)} = \sigma \cdot V_{рез2} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} \right)}, \quad (9)$$

$$\theta = \sigma \cdot V_{рез3} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)} = \sigma \cdot V_{рез3} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} + \frac{\Pi_3}{V_{рез3}} \right)}. \quad (10)$$

Разрешая зависимости (8), (9) и (10) относительно  $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}$  с учетом (7), приходим к квадратному уравнению относительно величины  $\sqrt{\tau}$ :

$$\tau - \frac{\Pi_3}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{\tau} - (\tau_1 + \tau_2) = 0. \quad (11)$$

Решение квадратного уравнения:

$$\tau = \frac{1}{4A} \cdot \left\{ \Pi_3 + \sqrt{\Pi_3^2 + \left[ \Pi_2 + \sqrt{(\Pi_2^2 + 4\Pi_1^2)} \right]^2} \right\}^2. \quad (12)$$

Установлено, что функция  $\tau$  имеет экстремум (минимум) от двух переменных:  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Экстремальные значения параметров  $\Pi_1$ ;  $\Pi_2$ ;  $\Pi_3$ ;  $\tau$  равны

$$\Pi_1 = 0,224 \cdot \Pi; \quad \Pi_2 = 0,337 \cdot \Pi; \quad \Pi_3 = 0,439 \cdot \Pi, \quad (13)$$

$$\tau_{min} = (0,05 + 0,15 + 0,314) \cdot \frac{\Pi^2}{A} = 0,514 \cdot \frac{\Pi^2}{A}. \quad (14)$$

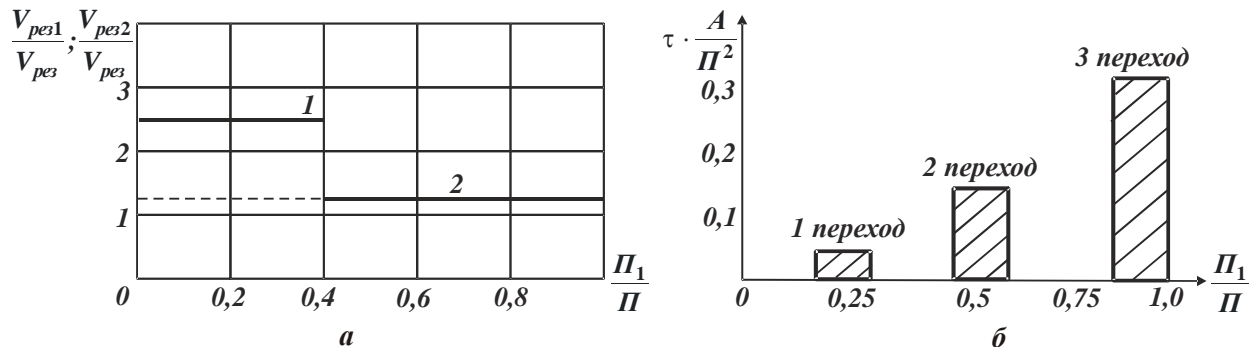


Рис. 2. Характер расположения зависимостей  $V_{рез1}/V_{рез}$  (1) и  $V_{рез2}/V_{рез}$  (2) на двух переходах (а) и характер изменения величины  $\tau \cdot A/\Pi^2$  по переходам (б).

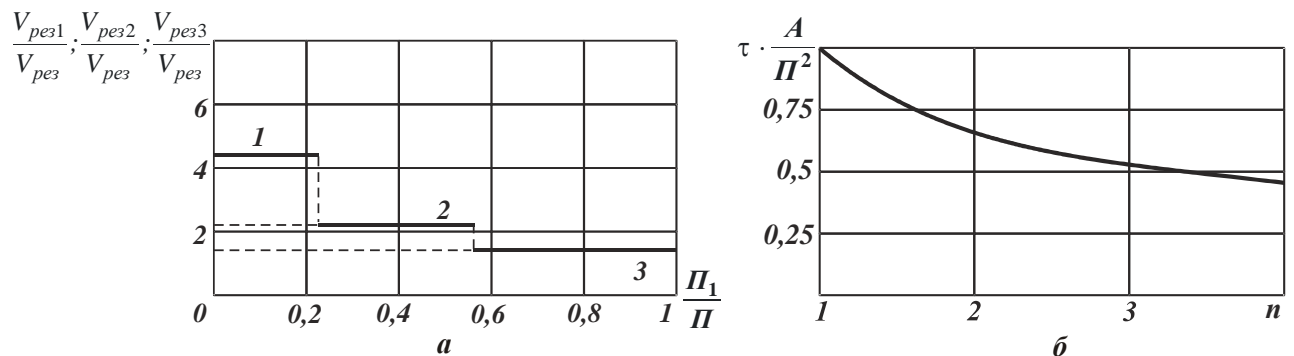


Рис. 3. Характер расположения зависимостей  $V_{рез1}/V_{рез}$  (1),  $V_{рез2}/V_{рез}$  (2) и  $V_{рез3}/V_{рез}$  (3) на трех переходах (а) и зависимость  $\tau \cdot A/\Pi^2$  от  $n$ .

По сравнению с шлифованием в два перехода основное время обработки на первом и втором переходах существенно меньше, рис. 2,б. По сравнению с шлифованием в два перехода (рис. 2,а) скорости  $V_{рез1}$ ,  $V_{рез2}$ ,  $V_{рез3}$  также увеличились, рис. 3,а. Следовательно, увеличение количества переходов позволяет увеличить скорости  $V_{рез1}$ ,  $V_{рез2}$ ,  $V_{рез3}$  при заданной температуре шлифования  $\theta$ , а это способствует снижению основного времени обработки. Произведем оценку основного времени обработки  $\tau$  при шлифовании в четыре перехода:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 = \frac{\Pi_1}{V_{рез1}} + \frac{\Pi_2}{V_{рез2}} + \frac{\Pi_3}{V_{рез3}} + \frac{\Pi_4}{V_{рез4}}, \quad (15)$$

где  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$  и  $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}, V_{рез4}$  – соответственно величины снимаемых припусков и скорости радиальных подач на 1-ом, 2-ом, 3-ем и 4-ом переходах;  $\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 = \Pi$  – суммарный снимаемый припуск, м.

Пользуясь вышеприведенной методикой, установлены экстремальные значения  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$  и минимум функции  $\tau$ :

$$\Pi_1 = 0,146 \cdot \Pi; \Pi_2 = 0,219 \cdot \Pi; \Pi_3 = 0,285 \cdot \Pi; \Pi_4 = 0,35 \cdot \Pi, \quad (16)$$

$$\tau_{min} = (0,021 + 0,063 + 0,133 + 0,233) \cdot \frac{\Pi^2}{A} = 0,45 \cdot \frac{\Pi^2}{A}. \quad (17)$$

Как видно, при шлифовании в четыре перехода минимальное основное время обработки  $\tau \cdot A / \Pi^2$  меньше, чем при шлифовании в три перехода, т.е. с увеличением количества переходов наблюдается уменьшение  $\tau \cdot A / \Pi^2$ , рис. 3,б. На рис. 4 показан характер изменения основного времени обработки  $\tau \cdot A / \Pi^2$  и скоростей  $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}, V_{рез4}$  при шлифовании в четыре перехода по отношению к шлифованию в один переход, когда  $V_{рез} = A / \Pi$ . По сравнению с шлифованием в один переход скорость  $V_{рез1}$  увеличилась в 6,952 раза, скорость  $V_{рез2}$  – в 3,476 раза, скорость  $V_{рез3}$  – в 2,142 раза, а скорость  $V_{рез4}$  – в 1,502 раза. По сравнению с шлифованием в два перехода (рис. 1,б) и в три перехода (рис. 2,а) скорости  $V_{рез1}, V_{рез2}, V_{рез3}, V_{рез4}$  также увеличились.

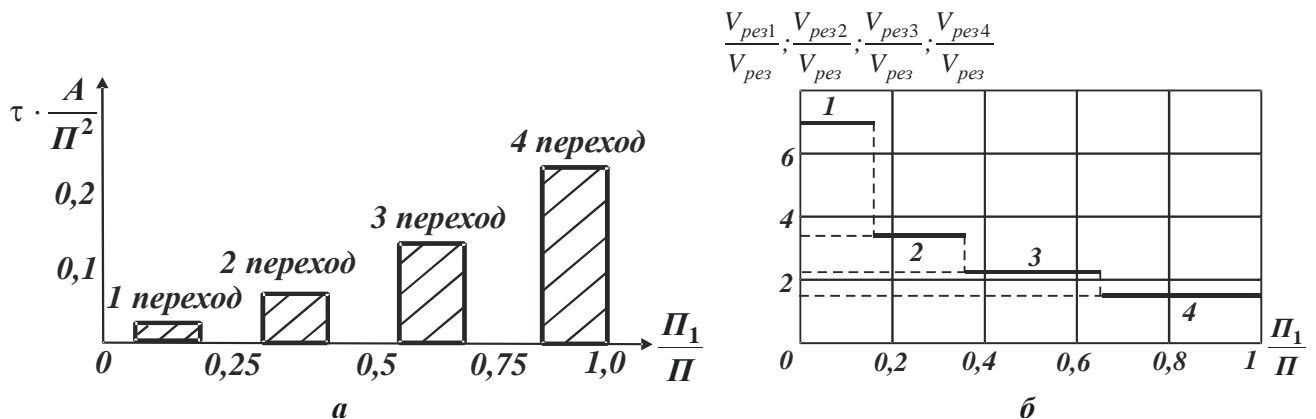


Рис. 4. Характер изменения величины  $\tau \cdot A / \Pi^2$  по переходам (а) и характер расположения зависимостей  $V_{рез1}/V_{рез}$  (1),  $V_{рез2}/V_{рез}$  (2) и  $V_{рез3}/V_{рез}$  (3)  $V_{рез4}/V_{рез}$  (4) на четырех переходах (б).

Аналогичным образом можно проанализировать характер изменения основного времени обработки и соответственно скоростей и снимаемых припусков для большего количества переходов. Однако тенденции их изменения, выявленные при анализе шлифования в два, три и четыре перехода, сохранятся. Это указывает на эффективность осуществления шлифования с переменной во времени скоростью  $V_{рез}$ . Чем больше отличие максимального и минимального значений скоростей, тем меньше будет основное время обработки при шлифовании. Исходя из этого, наиболее эффективным следует рассматривать

вариант шлифования, когда скорость  $V_{рез}$  во времени уменьшается от своего максимального значения до нуля. Очевидно, для реализации данного условия требуется создание автоматизированных циклов шлифования, что представляет значительные сложности. Более просто данное условие реализовать за счет, например, создания в технологической системе начального натяга, который при шлифовании (выхаживании) приведет к уменьшению во времени скорости  $V_{рез}$  вплоть до нуля.

Результаты исследований использованы при разработке эффективного процесса круглого наружного абразивного шлифования колец подшипников. Установлено, что применение шлифования с уменьшающейся по переходам скоростью радиальной подачи круга (в соответствии с предложенным в работе алгоритмом расчета) позволяет исключить образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов при одновременном увеличении производительности обработки.

### Список литературы

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.
3. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченко – Харків, ХДПУ, 1999. – 436 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. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с.
5. Кленов О.С. Теоретический анализ уменьшения температуры при шлифовании твердосплавных режущих пластин // Физические и компьютерные технологии: труды 14-й международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2008. – С. 469-473.