

**Новиков Ф.В.**, докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой  
"Техники и технологии"

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, г. Харьков, Украина

**Гершиков И.В.**, директор  
ЗАО "Азовский машиностроительный завод", г. Бердянск, Украина

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА**

*Определены условия повышения производительности обработки при шлифовании с учетом ограничения по температуре резания, даны практические рекомендации.*

*The conditions for increasing productivity when grinding with the restrictions on cutting temperature, practical recommendations.*

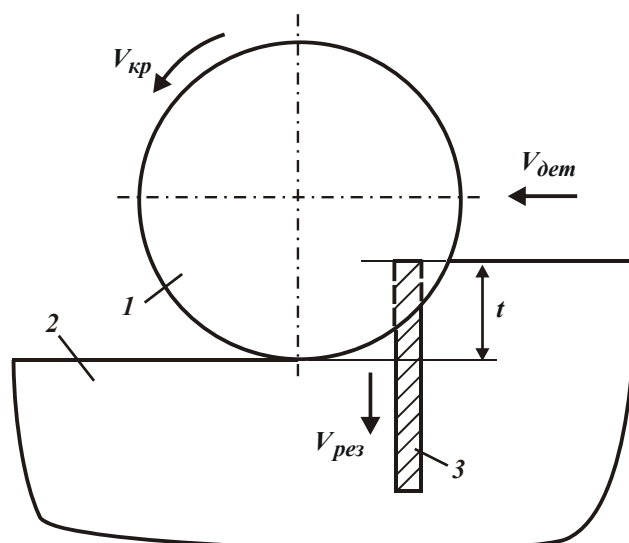
Исследованию проблемы повышения производительности и качества обработки при шлифовании в научно-технической литературе уделено большое внимание [1–3]. В настоящее время разработана формализованная теория теплофизики шлифования, позволяющая производить расчеты сложных температурных полей, возникающих в поверхностном слое обрабатываемых деталей при шлифовании. Однако, полученные теоретические решения, как правило, требуют численных расчетов для конкретных (частных) условий обработки, что затрудняет установление общих технологических закономерностей формирования параметров качества обработки при шлифовании и определение условий повышения производительности с учетом ограничения по температуре шлифования. Это требует разработки новых упрощенных теоретических подходов к расчету и анализу температуры шлифования, позволяющих производить оптимизационные расчеты параметров режимов шлифования по критериям наибольшей производительности или наименьшего штучного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования (температурному фактору).

Для определения температуры шлифования  $\theta$  воспользуемся аналитической зависимостью, приведенной в работе [2] (рис. 1):

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $q = \sigma \cdot V_{рез}$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $V_{рез}$  – скорость перерезания шлифовальным кругом бесконечно тонкого адиабатического стержня, набором которых представлен припуск, м/с;  $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho_m}}$  – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;  $\lambda$  – коэффициент

теплопроводности материала, Вт/(м·град);  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град);  $\rho_m$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau = t/V_{рез}$  – время перерезания кругом бесконечно тонкого адиабатического стержня, с.



**Рис. 1. Расчетная схема параметров шлифования:**  
1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень.

Зависимость (1) при круглом шлифовании периферией круга [2] с учетом  $V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{0,5 \cdot t \cdot \rho}$  примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{V_{дет}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}} \cdot \sqrt{\frac{2\rho}{t}}, \quad (2)$$

где  $V_{дет}$  – скорость вращения детали, м/с;  $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{дет}$  – радиусы круга и детали, м.

Как видно, с увеличением  $t$  и  $V_{дет}$  температура шлифования  $\theta$  увеличивается, однако с разной интенсивностью. Из этого вытекает, что добиться увеличения производительности обработки  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  при заданной температуре шлифования  $\theta$  можно за счет применения многопроходного шлифования, предполагающего увеличение  $V_{дет}$  и уменьшение  $t$  (где  $B$  – ширина шлифования, м). Следовательно, с точки зрения обеспечения производительности и качества обработки (при заданной температуре шлифования  $\theta$ ) применение многопроходного шлифования более эффективно по сравнению с глубинным (однопроходным) шлифованием. Однако при этом возникает задача определения предельной скорости детали  $V_{дет}$ , т.к. согласно зависимости (2), она может увеличиваться до бесконечности, а глубина шлифования  $t$  уменьшаться до нуля. Наиболее существенным ограничением увеличения  $V_{дет}$  может быть количество проходов круга, поскольку с их увеличением возрастает вспомогательное время, связанное с реверсированием стола

станка [3]. Исходя из этого, определим штучное время обработки  $T_{шт}$ , равное сумме основного  $T_{осн}$  и вспомогательного  $T_{всп}$  времени обработки на операции плоского шлифования. В этом случае  $R_{дет} \rightarrow \infty$ , соответственно  $\rho = 1/R_{кр}$ . Представляя  $T_{осн} = n \cdot \tau_{осн}$  и  $T_{всп} = n \cdot \tau_{всп}$ , получена зависимость для определения штучного времени обработки

$$T_{шт} = T_{осн} + T_{всп} = n \cdot (\tau_{осн} + \tau_{всп}), \quad (3)$$

где  $n$  – количество проходов круга;  $\tau_{осн} = L/V_{дет}$  – основное время обработки за один проход круга, с;  $\tau_{всп}$  – вспомогательное время обработки, затрачиваемое на реверсирование стола станка в пределах одного прохода круга, с;  $L$  – длина хода круга, м.

Скорость детали  $V_{дет}$  определяется из зависимости (2):

$$V_{дет} = \lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \left( \frac{\theta}{\sigma \cdot t} \right)^2 \cdot \left( \frac{t}{2\rho} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

где  $t = \Pi/n$ ;  $\Pi$  – величина снимаемого припуска, м.

Подставляя зависимость (4) в (3), получено:

$$T_{шт} = \frac{L}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m} \cdot \left( \frac{\Pi}{\theta} \right)^2 \cdot \left( \frac{2\rho}{n \cdot \Pi} \right)^{0,5} + n \cdot \tau_{всп}. \quad (5)$$

Количество проходов  $n$  неоднозначно влияет на штучное время обработки  $T_{шт}$ , т.е. существует экстремум функции  $T_{шт}$  от  $n$ . Для его определения следует подчинить функцию  $T_{шт}$  необходимому условию экстремума  $(T_{шт})'_n = 0$ . После преобразований определено экстремальное количество проходов круга и штучное время обработки:

$$n_{экстр} = \frac{\Pi}{\theta} \cdot \sqrt[3]{\left( \frac{L}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \tau_{всп}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\rho}{\theta} \right)}. \quad (6)$$

$$T_{шт.экстр} = (1,26 + 0,63) \cdot \frac{\Pi}{\theta} \cdot \sqrt[3]{\left( \frac{L}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m} \right)^2 \cdot \left( \frac{2\rho \cdot \tau_{всп}}{\theta} \right)}. \quad (7)$$

При этом установлено, что вторая производная  $(T_{шт})''_n$  в точке экстремума положительна, т.е. имеет место минимум функции  $T_{шт}$  от  $n$ .

Из зависимости (7) вытекает, что первое слагаемое (определяющее основное время обработки в точке экстремума функции  $T_{шт}$ ) в 2 раза больше второго слагаемого (определяющего вспомогательное время обработки). Уменьшить  $T_{шт.экстр}$  можно уменьшением параметров  $\Pi$ ,  $L$  и  $\tau_{всп}$ , а также увеличением заданной температуры шлифования  $\theta$ . Параметры режима шлифования  $t$  и  $V_{дет}$  не оказывают влияния на параметр  $T_{шт.экстр}$ , также как не оказывают влияния и на  $n_{экстр}$ .

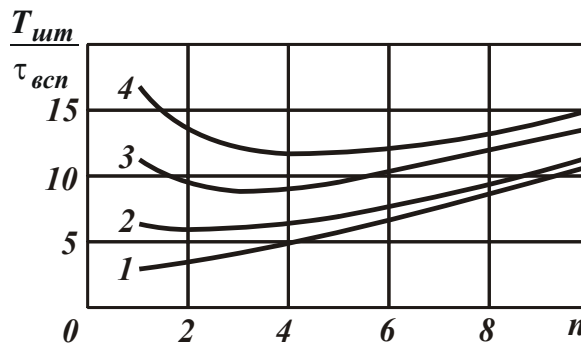
Между параметрами  $T_{шт.экстр}$  и  $n_{экстр}$  существует взаимосвязь

$$T_{шт.экстр} = 3 \cdot \tau_{всп} \cdot n_{экстр} \quad (8)$$

Отношение  $T_{шт.экстр}/n_{экстр}$  зависит лишь от величины  $\tau_{всп}$ . С учетом полученных выражений исходная зависимость для определения штучного времени обработки  $T_{шт}$  может быть представлено в виде:

$$T_{шт} = \tau_{всп} \cdot \left( \frac{2 \cdot n_{экстр}^{1,5}}{n^{0,5}} + n \right) \quad (9)$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по зависимости (9) значения безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$ . Как видно, с увеличением  $n$  величина  $T_{шт}/\tau_{всп}$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Экстремум отсутствует лишь в случае  $n_{экстр}=1$ . При этом с увеличением  $n_{экстр}$  минимум безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$  увеличивается и смещается в область больших значений  $n$ .



**Рис. 2. Зависимость безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$  от количества проходов круга  $n$ : 1...4 –  $n_{экстр}=1...4$ .**

Произведем расчет параметра  $n_{экстр}$  и соответствующих ему оптимальных параметров режима шлифования  $t$  и  $V_{дет}$  плоской пластины из закаленной стали 18ХГН2МФБ твердостью HRC 57...63 абразивным кругом 1А1 350х15х76 24А 40 СМ1 К6 со структурой 7 (без применения СОЖ). Принимая исходные данные:  $L=100$  мм;  $\Pi=0,4$  мм;  $R_{кр}=0,15$  м;  $R_{дет} \rightarrow 0$ ;  $\rho=6,67$  м<sup>-1</sup>;  $\tau_{всп}=0,5$  с;  $\theta=800^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda=42$  Вт/(м·град);  $c \cdot \rho_m=5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град), экспериментально установлено, что условное напряжение резания  $\sigma=15 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>. Подставляя исходные данные в (6), получено  $n_{экстр}=5,4$  (принято  $n_{экстр}=6$ ). Тогда  $t = \Pi / n_{экстр} = 0,067$  мм. Скорость детали  $V_{дет}$ , определяемая зависимостью (4), равна  $V_{дет}=17,9$  м/мин.

Для меньшей длины хода круга  $L=50$  мм, эти параметры принимают значения:  $n_{экстр}=3,4$  (принято  $n_{экстр}=4$ );  $t=0,1$  мм;  $V_{дет}=9,9$  м/мин. Как видно, с уменьшением  $L$  количество проходов круга  $n_{экстр}$  и скорость

детали  $V_{дет}$  уменьшаются, а глубина шлифования  $t$  – увеличивается, т.е. наблюдается тенденция перехода от многопроходного к глубинному шлифованию. Следовательно, вспомогательное время обработки, связанное с реверсированием стола станка, является существенным ограничивающим фактором увеличения скорости детали  $V_{дет}$  в условиях многопроходного шлифования. Собственно этим объясняется тот факт, что на практике скорость детали изменяется в ограниченных пределах.

### **Выводы**

1. В работе произведена оптимизация параметров режима шлифования по критерию наименьшего штучного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования. На этой основе обоснованы условия повышения производительности и качества обработки, состоящие в применении многопроходного шлифования и выборе оптимального количества проходов круга, глубины шлифования и скорости детали в соответствии с полученными аналитическими зависимостями.

2. Установлено, что штучное время обработки с изменением количества проходов круга изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Доказано, что в точке экстремума основное время обработки в 2 раза больше вспомогательного времени обработки, а отношение экстремальных значений штучного времени обработки и количества проходов круга в 3 раза больше вспомогательного времени обработки.

3. Теоретически установлено, что параметры режима многопроходного шлифования существенно ограничены величиной вспомогательного времени обработки, затрачиваемого на реверсирование стола станка, и поэтому его необходимо учитывать при выборе оптимальных условий шлифования.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.

2. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

3. Новиков Ф. В. Оптимизация параметров режима шлифования зубчатых колес / Ф.В. Новиков, В. В. Нежебовский // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – Вып.12. – С. 56–62.