

## УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Постановка проблемы.** Создание высококачественной машиностроительной продукции требует эффективных методов механической обработки деталей машин и в особенности методов шлифования, обеспечивающих высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. Вместе с тем, после обработки шлифованием на обрабатываемых поверхностях зачастую появляются прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты, что с точки зрения качества обработки не допустимо и требует снижения режимов шлифования и соответственно производительности. В связи с этим актуальна проблема изыскания новых технологических возможностей повышения производительности шлифования при одновременном обеспечении высококачественной обработки, исключающей образование температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях деталей. Это предполагает решение оптимизационной задачи по определению условий повышения производительности обработки с учетом ограничения по температуре шлифования, т.е. по температурному фактору.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследованию проблемы повышения производительности и качества обработки при шлифровании в научно-технической литературе уделено чрезвычайно большое внимание [1-4]. В настоящее время разработана формализованная теория теплофизики шлифования, позволяющая производить расчеты сложных температурных полей, возникающих в поверхностном слое обрабатываемых деталей при шлифровании, научно обоснованно подходить к выбору рациональных характеристик шлифовальных кругов и параметров режимов шлифования. 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 шлифровании 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).

**Цель статьи.** Теоретическое и экспериментальное обоснование условий повышения производительности и качества обработки при шлифровании с учетом ограничения по температуре шлифования.

**Изложение основного материала.** Для определения температуры шлифования  $\theta$  воспользуемся аналитической зависимостью, приведенной в работе [5] (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 снимаемый припуск, м/с;  $l_2$  – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho_m}}; \quad (2)$$

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

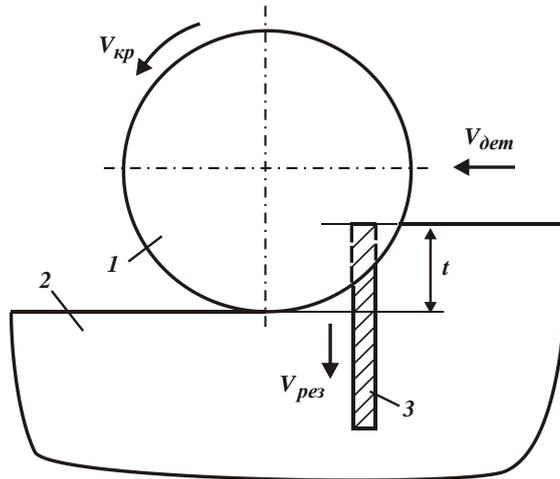


Рис. 1. Расчетная схема параметров шлифования: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень.

При круглом шлифовании периферией круга [5]:  $V_{рез} = V_{дем} \cdot \sqrt{0,5 \cdot t \cdot \rho}$ , где  $V_{дем}$  – скорость вращения детали, м/с;  $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дем}$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{дем}$  – радиусы круга и детали, м.

Тогда зависимость (1) окончательно примет вид

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{V_{дем}}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}} \cdot \sqrt{\frac{2\rho}{t}} \quad (3)$$

Как видно, с увеличением глубины шлифования  $t$  и скорости детали  $V_{дем}$  температура шлифования  $\theta$  увеличивается, однако с разной интенсивностью. Из этого вытекает, что добиться увеличения производительности обработки  $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t$  при заданной температуре шлифования  $\theta$  можно за счет применения многопроходного шлифования, предполагающего увеличение  $V_{дем}$  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  $V_{дем}$ , т.к. согласно зависимости (3), она может увеличиваться до бесконечности, а глубина шлифования  $t$  соответственно уменьшаться до нуля. Наиболее существенным ограничением увеличения скорости детали  $V_{дем}$  может быть количество проходов круга, поскольку с их увеличением возрастает вспомогательное время обработки, связанное с реверсированием стола станка [6]. Исходя из этого, определим штучное время обработки  $T_{ум}$ , равное сумме основного  $T_{осн}$  и вспомогательного  $T_{всп}$  времени обработки на операции плоского шлифования. В этом случае  $R_{дем} \rightarrow \infty$ , соответственно  $\rho = 1/R_{кр}$ . Представляя  $T_{осн} = n \cdot \tau_{осн}$  и  $T_{всп} = n \cdot \tau_{всп}$ , получим зависимость для определения штучного времени обработки

$$T_{ум} = T_{осн} + T_{всп} = n \cdot (\tau_{осн} + \tau_{всп}), \quad (4)$$

где  $n$  – количество проходов круга;  $\tau_{осн} = L/V_{дем}$  – 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  $V_{дем}$  определим из зависимости (3):

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

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

Подставим зависимость (5) в (4):

$$T_{ум} = \frac{L}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m} \cdot \left(\frac{\Pi}{\theta}\right)^2 \cdot \left(\frac{2\rho}{n \cdot \Pi}\right)^{0,5} + n \cdot \tau_{всп}. \quad (6)$$

Как видно, количество проходов  $n$  неоднозначно влияет на штучное время обработки  $T_{ум}$ , т.е. существует экстремум функции  $T_{ум}$  от  $n$ . Для его определения починим функцию  $T_{ум}$  необходимому условию экстремума  $(T_{ум})'_n = 0$ . После преобразований получим выражения для определения экстремальных значений количества проходов круга и штучного времени обработки:

$$n_{\text{экстр}} = \frac{\Pi}{\theta} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L}{\lambda \cdot c \cdot \rho_M \cdot \tau_{\text{всп}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\rho}{\theta}\right)} \quad (7)$$

$$T_{\text{шт.экстр}} = (1,26 + 0,63) \cdot \frac{\Pi}{\theta} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L}{\lambda \cdot c \cdot \rho_M}\right)^2 \cdot \left(\frac{2\rho \cdot \tau_{\text{всп}}}{\theta}\right)} \quad (8)$$

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

Из зависимости (8) вытекает, что первое слагаемое (определяющее основное время обработки в точке экстремума функции  $T_{\text{шт}}$ ) в 2 раза больше второго слагаемого (определяющего вспомогательное время обработки). Уменьшить  $T_{\text{шт.экстр}}$  можно уменьшением параметров  $\Pi$ ,  $L$  и  $\tau_{\text{всп}}$ , а также увеличением заданной температуры шлифования  $\theta$ . Параметры режима шлифования  $t$  и  $V_{\text{дет}}$  не оказывают влияния на параметр  $T_{\text{шт.экстр}}$ , также как не оказывают влияния и на  $n_{\text{экстр}}$ .

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

$$T_{\text{шт.экстр}} = 3 \cdot \tau_{\text{всп}} \cdot n_{\text{экстр}} \quad (9)$$

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

$$T_{\text{шт}} = \tau_{\text{всп}} \cdot \left( \frac{2 \cdot n_{\text{экстр}}^{1,5}}{n^{0,5}} + n \right) \quad (10)$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по зависимости (10) значения безразмерной величины  $T_{\text{шт}} / \tau_{\text{всп}}$ . Как видно, с увеличением количества проходов круга  $n$  безразмерная величина  $T_{\text{шт}} / \tau_{\text{всп}}$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Экстремум отсутствует лишь в случае  $n_{\text{экстр}} = 1$ . При этом с увеличением  $n_{\text{экстр}}$  минимум безразмерной величины  $T_{\text{шт}} / \tau_{\text{всп}}$  увеличивается и смещается в область больших значений  $n$ .

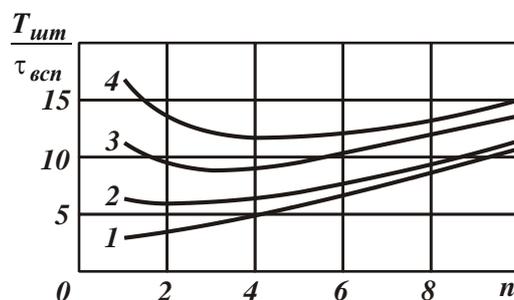


Рис. 2. Зависимость безразмерной величины  $T_{\text{шт}} / \tau_{\text{всп}}$  от количества проходов круга  $n$ : 1 –  $n_{\text{экстр}} = 1$ ; 2 –  $n_{\text{экстр}} = 2$ ; 3 –  $n_{\text{экстр}} = 3$ ; 4 –  $n_{\text{экстр}} = 4$ .

Произведем расчет параметра  $n_{\text{экстр}}$  и соответствующих ему оптимальных параметров режима шлифования  $t$  и  $V_{\text{дет}}$  для плоского пластины из закаленной стали 18ХГН2МФБ твердостью HRC 57...63 абразивным кругом 1A1 350x15x76 24A 40 CM1 K6 со структурой 7 (без применения СОЖ). Примем следующие исходные данные:  $L = 100$  мм;  $\Pi = 0,4$  мм;  $R_{\text{кр}} = 0,15$  м;  $R_{\text{дет}} \rightarrow 0$ ;  $\rho = 6,67$  м<sup>-1</sup>;  $\tau_{\text{всп}} = 0,5$  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 зависимость (7), получено  $n_{\text{экстр}} = 5,4$  (принято  $n_{\text{экстр}} = 6$ ). Тогда  $t = \Pi / n_{\text{экстр}} = 0,067$  мм. Скорость детали  $V_{\text{дет}}$ , определяемая зависимостью (5), равна  $V_{\text{дет}} = 17,9$  м/мин.

Для меньшей длины хода круга  $L = 50$  мм, эти параметры соответственно принимают значения:  $n_{\text{экстр}} = 3,4$  (принято  $n_{\text{экстр}} = 4$ );  $t = 0,1$  мм;  $V_{\text{дет}} = 9,9$  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 шлифования к глубинному шлифованию.

Таким образом расчетами установлено, что 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.

#### Список использованных источников:

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
4. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
5. 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.
6. Новиков Ф. В. Оптимизация параметров режима шлифования зубчатых колес / Ф.В. Новиков, В. В. Нежебовский // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2010. - Вып.12. - С.56-62.

#### Bibliography:

1. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A.V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s.
2. Reznikov A.N. Teplofizika protsesov mekhanicheskoy obrabotki materialov / A.N. Reznikov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 279 s.
3. Sipaylov V.A. Teplovye protsesy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti / V.A. Sipaylov. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 166 s.
4. Silin S.S. Metod podobiya pri rezanii materialov / S.S. Silin. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 152 s.
5. Teoreticheskie osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov: ucheb. Posobie / A.V. Yakomov, F.V. Novikov, G.V. Novikov, B.S. Serov, A.A. Yakomov. – Odessa: OGPU, 1999. – 450 s.
6. Novikov F.V. Optimizatsiya parametrov rezhima shlifovaniya zubchatykh koles / F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskiy // Zashchita metallurgicheskikh mashin ot polomok. – Mariupol, 2010. – Vyp.12. – S.56-62.

*Статья поступила 12.04.2012 г.*