

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НА ОСНОВЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КРИТЕРИЯ

Шлифование является одним из основных методов формообразования поверхностей деталей машин, обеспечивающих высококачественную обработку. Однако, как показывает практика, шлифование характеризуется относительно высокой теплонпряженностью процесса, в результате чего температура может достигать предельного значения, при котором в поверхностном слое обрабатываемой детали происходят глубокие структурные превращения, а на поверхности появляются прижоги и микротрещины. В особой мере это проявляется при шлифовании материалов с повышенными физико-механическими свойствами (высокопрочных сталей, твердых сплавов и т.д.), что приводит к необходимости снижения режимов шлифования и соответственно уменьшения производительности обработки, а это неэффективно. В связи с этим, актуальна задача определения максимально возможной производительности шлифования при условии обеспечения бездефектной обработки.

Необходимо отметить, что решению данной задачи в научно-технической литературе уделено достаточно большое внимание, в результате чего удалось математически описать температурные поля, возникающие в поверхностном слое обрабатываемой детали, определить температуру шлифования и научно-обоснованно подойти к выбору оптимальных параметров режима шлифования, реализующих наибольшую производительность обработки с учетом ограничения по температуре шлифования [1-3]. Однако, полученные теоретические решения чрезвычайно сложны, требуют численных расчетов и не позволяют на инженерном уровне получить общие решения и оценить максимально возможную производительность обработки. Поэтому решения сводятся к частным случаям, что не дает общего представления о технологических возможностях процесса шлифования с точки зрения производительности и качества обработки.

В последние годы наметилась тенденция решения температурных задач при шлифовании, не прибегая к использованию сложного дифференциального уравнения Лапласа [4]. Такой подход позволяет получить более общие, хотя и упрощенные решения, и на их основе определить максимально возможную производительность обработки с учетом ограничения по температуре шлифования. В связи с этим, представляется важным и актуальным применение данного подхода для решения конкретных задач по повышению эффективности процесса шлифования.

Целью работы является теоретический анализ максимально возможной производительности обработки с учетом ограничения по температуре шлифования и разработка практических рекомендаций по повышению эффективности обработки для различных случаев шлифования.

Как установлено многочисленными экспериментальными исследованиями, температурный фактор при шлифовании является основным ограничением интенсификации параметров режима резания и производительности обработки. В связи с этим, съем припуска производится не за один, а за определенное количество проходов круга, чем исключается образование на обрабатываемых поверхностях прижогов и других температурных дефектов. При выборе оптимального режима шлифования стремятся глубину шлифования уменьшать, а скорость детали, наоборот, увеличивать с целью повышения производительности обработки. Такая закономерность, в частности, вытекает из аналитической зависимости для определения температуры шлифования

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

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; t – глубина шлифования, м; V_{dem} – скорость детали, м/с; $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$; $R_{кр}$, $R_{дет}$ – радиусы круга и детали, м; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град); c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град); ρ_m – плотность материала, кг/м³.

Однако при этом значительно увеличивается количество проходов круга n , что приводит к потере времени из-за реверсирования стола станка и соответственно увеличению штучного времени обработки $T_{шт} = T_{осн} + T_{всп} = n \cdot (\tau_{осн} + \tau_{всп})$, где $T_{осн}$ и $T_{всп}$ – основное и вспомогательное время обработки, с; $\tau_{осн} = L/V_{дет}$ – 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 стола станка, например, при плоском шлифовании, м [5]. При этом следует считать, что шлифование производится при прямом и обратном ходах стола станка.

Расчетами установлено, что с учетом ограничения по температуре шлифования θ , определяемой зависимостью (1), и с учетом $t = \Pi/n$ (где Π – величина снимаемого припуска, м) штучное время обработки

$T_{ум}$ неоднозначно зависит от количества проходов круга n , проходя точку экстремума (минимума). При этом экстремальные значения количества проходов круга $n_{экстр}$ и штучного времени обработки $T_{ум.экстр}$ для плоского шлифования ($R_{дет} \rightarrow \infty$) описываются зависимостями:

$$n_{экстр} = \frac{\sigma \cdot \Pi}{\theta} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \tau_{всп}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\theta}\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R_{кр}}} ; \quad (2)$$

$$T_{ум.экстр} = (2+1) \cdot n_{экстр} \cdot \tau_{всп} = 3 \cdot \frac{\sigma \cdot \Pi}{\theta} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L}{\lambda \cdot c \cdot \rho_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma \cdot \tau_{всп}}{2 \cdot \theta \cdot R_{кр}}\right)} . \quad (3)$$

Тогда в обобщенном виде зависимость для определения штучного времени обработки $T_{ум}$ выражается:

$$T_{ум} = \tau_{всп} \cdot \left(\frac{2 \cdot n_{экстр}^{1,5}}{n^{0,5}} + n \right) . \quad (4)$$

Вполне очевидно, что зависимость (4) носит экстремальный характер от количества проходов круга n .

Без учета вспомогательного времени обработки, т.е. принимая второе слагаемое зависимости (4) равным нулю, получим

$$T_{ум} = \frac{2 \cdot n_{экстр}^{1,5}}{n^{0,5}} \cdot \tau_{всп} . \quad (5)$$

Для наглядности полученного решения на рис. 1 приведены рассчитанные по зависимостям (4) и (5) значения безразмерной величины $T_{ум} / \tau_{всп}$ для случая $n_{экстр} = 3$. Как видно, учет затрат времени на реверсирование стола станка (кривая 2) нивелирует эффект шлифования, связанный с уменьшением штучного времени обработки (отношения $T_{ум} / \tau_{всп}$) при увеличении количества проходов круга n (кривая 1). В точке экстремума значение $T_{ум} / \tau_{всп}$, рассчитанное по зависимости (4), в 1,5 раза больше значения $T_{ум} / \tau_{всп}$, рассчитанного по зависимости (5). Данный вывод вытекает также из зависимости (3), поскольку первое слагаемое, определяющее основное время обработки, в 2 раза больше второго слагаемого, определяющего вспомогательное время обработки.

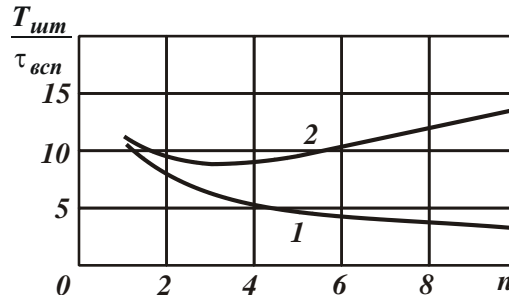


Рис. 1. Зависимость безразмерной величины $T_{ум} / \tau_{всп}$ от количества проходов круга n : 1 – расчет по зависимости (5); 2 – расчет по зависимости (4).

Из зависимости (2) следует, что с уменьшением вспомогательного времени обработки $\tau_{всп}$ экстремум функции $T_{ум}$ смещается в область больших значений n , а значение $T_{ум.экстр}$ уменьшается. При $\tau_{всп} \rightarrow 0$ справедливо условие $n_{экстр} \rightarrow \infty$, т.е. экстремум функции $T_{ум}$ фактически вырождается и кривые 1 и 2 на рис. 1 совпадают. В этом случае, в связи с отсутствием потерь времени на реверсирование стола станка, в максимальной степени реализуются потенциальные возможности шлифования, определяемые исходными зависимостями (1) и (5).

Анализ зависимости (3) показывает, что в нее не входят параметры режима шлифования и выполняется условие $\tau_{осн} = 2\tau_{всп}$. Отсутствие в зависимости (3) таких параметров как глубина шлифования t и скорость детали $V_{дет}$ указывает на то, что вследствие потери времени на реверсирование стола станка, нивелируется эффект повышения производительности обработки при многопроходном шлифовании, связанный с увеличением $V_{дет}$ и уменьшением t в соответствии с зависимостью (1), т.е., по сути, нивелируется эффект уменьшения $T_{ум} / \tau_{всп}$ при увеличении количества проходов круга n (кривая 1 на рис. 1).

Как следует из зависимости (3), для каждого значения L , Π и $\tau_{всп}$, а также каждой марки обрабатываемого материала (значений λ , c , ρ_m) существует вполне конкретное значение экстремального

(минимального) штучного времени обработки $T_{шт.экстр}$, не зависящее от режима шлифования. Это чрезвычайно важное практическое решение, которое свидетельствует о том, что процессы многопроходного и глубинного шлифования равносильны с точки зрения обеспечения штучного времени обработки (по сути, производительности обработки) для заданной температуры шлифования θ . Эффект уменьшения $T_{шт}$ и соответственно повышения производительности обработки зависит от параметров L , Π и $\tau_{всн}$, а также параметров σ и θ , тогда как в теории и практике шлифования принято считать многопроходное и глубинное шлифование различными по уровню достижения штучного времени обработки $T_{шт}$ (производительности обработки) для заданной температуры шлифования θ .

Полученное решение открывает новые технологические возможности эффективного использования процесса шлифования, правильного выбора рациональных параметров режима резания. Собственно этим можно объяснить то, что на практике не удалось добиться существенного эффекта (повышения производительности) как от применения многопроходного, так и глубинного шлифования, поскольку, исходя из полученного решения, эффект обработки обусловлен лишь правильным выбором параметров режима резания для заданных от параметров L , Π и $\tau_{всн}$. Поэтому глубинное (однопроходное) шлифование следует рассматривать лишь как частный случай многопроходного шлифования, реализуемый при обработке деталей небольшой длины L с небольшой скоростью детали $V_{дем}$.

Как отмечалось выше, экстремальное (минимальное) штучное время обработки $T_{шт.экстр}$ с учетом ограничения по температуре шлифования θ достигается при условии $\tau_{осн} = 2\tau_{всн}$. Используя данное условие, можно определить оптимальные параметры режима шлифования, рассматривая $\tau_{осн} = L/V_{дем}$. Откуда

$$V_{дем} = \frac{L}{2 \cdot \tau_{всн}}. \quad (6)$$

При плоском шлифовании параметр L определяет длину хода стола станка, а при круглом продольном шлифовании – длину развертки винтовой линии на цилиндрической детали. При плоском шлифовании параметр L изменяется в относительно небольших пределах, как правило, до 0,5 м. Тогда при условии $\tau_{всн} = 0,5$ с скорость детали $V_{дем} = 30$ м/мин. Если вспомогательное время обработки $\tau_{всн}$ больше, то скорость детали $V_{дем}$ уменьшится. На практике при плоском шлифовании она в основном не превышает 30 м/мин.

При обработке детали небольшой длины, например, $L = 0,05$ м, скорость детали $V_{дем}$ при условии $\tau_{всн} = 0,5$ с равна $V_{дем} = 3$ м/мин, что фактически соответствует условиям глубинного шлифования. Глубина шлифования t при этом устанавливается на основе зависимости (1) для определения температуры шлифования θ , а количество проходов круга n при съеме припуска Π на основе зависимости $n = \Pi/t$. Для определения глубины шлифования t необходимо располагать количественными значениями входящих в зависимость (1) параметров: λ , c , ρ_m , σ , Π , L , $R_{кр}$, θ , $\tau_{всн}$. Таким образом показано, что скорость детали $V_{дем}$ существенно ограничена величиной вспомогательного времени обработки $\tau_{всн}$. Чтобы исключить это ограничение, необходимо, например, плоское шлифование деталей осуществлять на плоскошлифовальном станке не с прямоугольным, а с вращающимся столом. Это позволит существенно увеличить скорость детали $V_{дем}$ и количество проходов круга n , уменьшая глубину шлифования t и увеличивая производительность обработки при обеспечении заданной температуры шлифования θ .

Оценим возможности увеличения скорости детали $V_{дем}$ при круглом продольном многопроходном шлифовании. В этом случае

$$L = \pi \cdot D_{дем} \cdot \frac{l}{B}, \quad (7)$$

где $D_{дем}$, l – диаметр и длина детали, м; B – ширина шлифования, м.

Как видно, параметр L при круглом продольном многопроходном шлифовании может принимать значительно большие значения, чем при плоском шлифовании. Причем, с уменьшением параметра B (равного продольной подаче на оборот детали) длина L увеличивается, достигая нескольких метров, что согласно зависимости (7) предполагает существенное увеличение скорости детали $V_{дем}$, например, до значений 200–500 м/мин и более. В этом случае, очевидно, потери времени $\tau_{всн}$, связанные с реверсированием стола станка, мало влияют на скорость детали $V_{дем}$, которая может устанавливаться достаточно большой исходя из технических возможностей круглошлифовального станка. В большинстве же случаев круглого продольного многопроходного шлифования, согласно зависимостям (6) и (7), скорость детали $V_{дем}$ принимает относительно небольшие значения и поэтому фактор потери времени из-за реверсирования стола станка существенно ограничивает увеличение $V_{дем}$. Чтобы его исключить, необходимо перейти от схемы продольного многопроходного шлифования к схеме шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей

уступами [6]. В этом случае при шлифовании одного уступа отсутствует необходимость реверсирования стола станка и поэтому отсутствует ограничение на увеличение скорости детали $V_{дет}$. Она может быть установлена максимально возможной для конкретного круглошлифовального станка, а глубина шлифования t , наоборот, - минимально возможной. В итоге будет достигаться максимально возможная производительность обработки при условии обеспечения заданной температуры шлифования, исключающей образование температурных дефектов на обрабатываемой поверхности. В обобщенном виде условия повышения производительности обработки на основе полученных теоретических решений показаны на рис. 2.

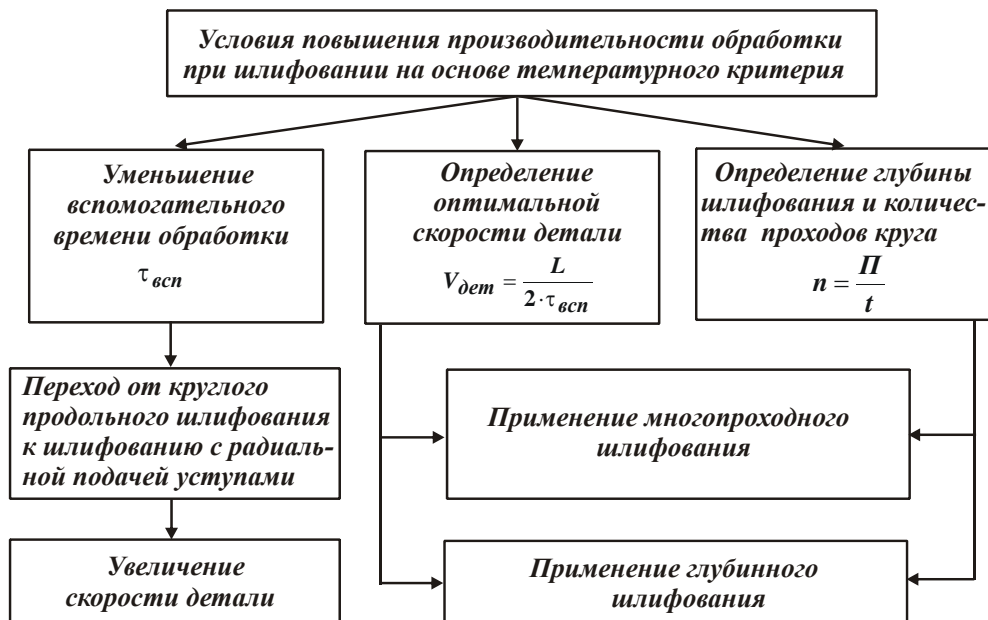


Рис. 2. Структурная схема условий повышения производительности обработки при шлифовании на основе температурного критерия.

Выводы

Теоретически на основе учета затрат времени на реверсирование стола станка при шлифовании определена максимально возможная производительность обработки при условии обеспечения заданной температуры шлифования. Доказано, что она не зависит от параметров режима шлифования, а определяется геометрически параметрами обрабатываемой детали и снимаемого припуска. В этом плане по производительности многопроходное и глубинное шлифование равносильны и отличаются лишь параметрами режима резания. Причем, глубинное шлифование, по сути, является частным случаем многопроходного шлифования, осуществляемого с небольшой длиной продольного хода стола плоскошлифовального станка и соответственно небольшой скоростью детали при сьеме припуска за один проход. Установлено, что одним из основных условий повышения производительности шлифования является уменьшение вспомогательного времени обработки. Это в частности, достигается переходом от обычного круглого продольного многопроходного шлифования к шлифованию последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами, а также переходом от плоского многопроходного шлифования на прямоугольном столе к шлифованию на вращающемся столе, когда фактически полностью исключаются затраты времени, связанные с реверсированием стола станка, и обеспечивается увеличение скорости детали и соответственно производительность обработки при сохранении заданной температуры 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. 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.
5. 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.
6. Кашук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кашук, А.Б. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.

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. 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.
5. 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.
6. Kashyk V.A. Spravochnik shlifovshika / V.A. Kashyk, A.B. Vereshagin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 480 s.

Статья поступила 12.04.2012 г.