

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ ПРИ
ОБРАБОТКЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Надежность и ресурс работы зубчатых колес во многом зависит от качества их механической обработки, которое, как правило, формируется на операциях шлифования. Поэтому проблеме повышения качества обработки зубчатых колес постоянно уделяется большое внимание [1]. Так, в настоящее время разработаны типовые технологические процессы шлифования, в частности с применением прерывистых кругов [2], позволяющих существенно снизить тепловую напряженность шлифования и исключить образование на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов (прижогов и микротрещин). Доказана эффективность применения импрегнированных (термообработанных) абразивных кругов, обеспечивающих снижение интенсивности трения в зоне обработки и т.д. Вместе с тем, все возрастающие требования к качеству и точности изготовления зубчатых колес, в частности, для приводов шахтных конвейеров, предполагают поиск новых технологических решений, разработку более эффективных технологических процессов, станков и инструментов. В связи с этим целью работы является обоснование путей повышения качества и производительности финишной механической обработки зубчатых колес.

В работе [3] показано, что при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью $V_{рез}$ (рис. 1), температура θ определяется аналитической зависимостью:

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

где $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; σ – условное напряжение резания, Н/м²; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К; τ – время обработки, с; l_1 – снимаемый припуск, м; l_2 – толщина слоя образца, в котором концентрируется выделяющееся при резании тепло, м.

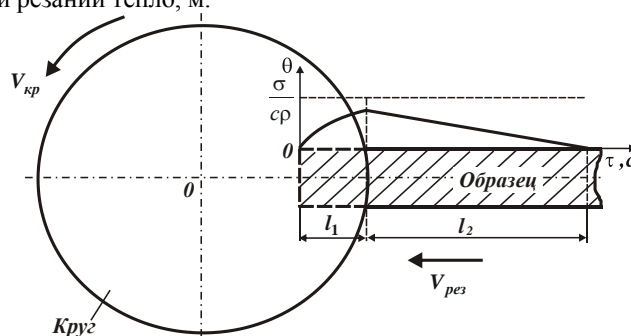


Рис. 1. Расчетная схема шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга.

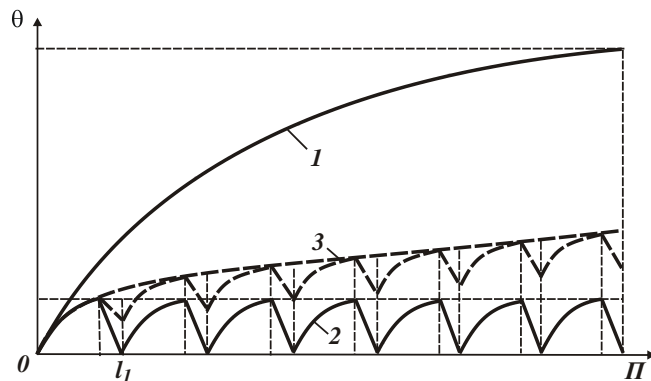


Рис. 2. Зависимость температуры шлифования θ от величины снимаемого припуска Π при обработке в один переход и отсутствии остывания обрабатываемого образца (1) и при обработке в n переходов при полном (2) и частичном (3) остывании образца.

Уменьшить температуру шлифования θ можно уменьшением условного напряжения резания σ (энергоемкости обработки) и за счет периодического прерывания процесса шлифования с целью охлаждения обрабатываемого образца, рис. 2. Во втором случае припуск Π удаляется частями (длиной l_1). Очевидно, с увеличением количества разбиений припуска на части температура шлифования θ уменьшается, а скорость $V_{рез}$ и соответственно производительность обработки увеличиваются. Однако, чтобы реализовать данное условие необходимо обеспечить полное остывание образца в период прерывания процесса шлифования. В противном случае температура шлифования θ с течением времени обработки будет увеличиваться. Естественно, для этого следует использовать технологические среды, обеспечивающие интенсивное охлаждение образца. Вместе с тем, решить данную задачу в полной мере весьма сложно как при плоском или круглом наружном многопроходном шлифовании (при периодическом выходе круга из контакта с обрабатываемой деталью), так и при прерывистом шлифовании, характеризующимся периодическим контактом круга с обрабатываемым материалом [2]. Исходя из этого, съем припуска целесообразно производить за один проход круга или за несколько проходов, но с прерыванием процесса на достаточно длительное время, необходимое для полного остывания обрабатываемой детали. Такой вариант обработки возможен, например, при шлифовании зубчатого колеса, осуществляя поочередно лишь один проход круга при шлифовании каждого зуба колеса. Второй проход, так же как и последующие проходы круга, будут осуществляться после обработки всех зубьев, а это позволит обеспечить полное остывание каждого зуба после его обработки. Следовательно, при шлифовании по данной схеме реализуется условие полного остывания обрабатываемой поверхности в период прерывания процесса шлифования, а это существенно упрощает решение задачи снижения температуры шлифования.

В соответствии с зависимостью (1) температура шлифования θ будет определяться в основном произведением двух параметров: $V_{рез}$ и l_1 . При плоском шлифовании торцом круга (шлифовании зубчатого колеса) параметр l_1 равен глубине шлифования t , а скорость $V_{рез} = t/\tau$, где $\tau = B/V_{дет}$ – время перерезания элементарного адиабатического стержня, которыми условно представлен снимаемый припуск (рис. 3 [3, 4]); $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; B – длина контакта круга с деталью (длина теплового источника), м. С учетом сказанного зависимость (1) примет вид

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot Q_{y0}}, \quad (2)$$

где $Q_{y0} = t \cdot V_{дет}$ – удельная производительность обработки, м³/с.

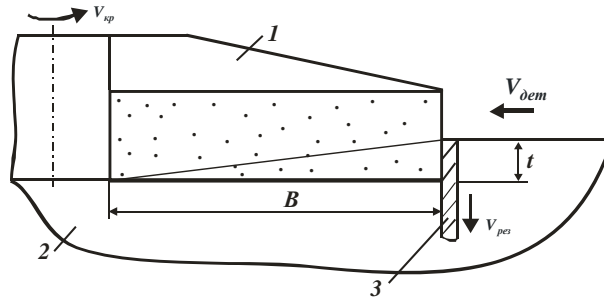


Рис. 3. Расчетная схема шлифования торцом круга: 1 – круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень.

Как следует из зависимости (2) уменьшить температуру шлифования θ при одной и той же производительности обработки можно уменьшением глубины шлифования t , т.е. увеличивая количество проходов круга при съеме заданного припуска Π . Однако, как известно, с увеличением количества проходов возрастает доля вспомогательного времени, связанного с реверсированием стола станка. Поэтому должно быть оптимальное количество проходов круга n , при котором штучное время принимает минимальное значение. Представим штучное время как сумму основного и вспомогательного времени на операции шлифования зубчатого колеса:

$$T_{ум} = z \cdot n \cdot \left(\frac{L}{V_{дем}} + T_{всп} \right), \quad (3)$$

где z – количество зубьев; L – длина продольного хода круга, м.

Скорость детали $V_{дем}$ установим из условия обеспечения заданной температуры шлифования θ на основе зависимости (2). Разрешая зависимость (2) с учетом $t = \Pi/n$, имеем

$$V_{дем} = \left(\frac{\theta}{\sigma} \right)^2 \cdot \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda}{2} \cdot \frac{B \cdot n^2}{\Pi^2}. \quad (4)$$

Подставим зависимость (4) в (3):

$$T_{ум} = z \cdot \left[\left(\frac{\sigma}{\theta} \right)^2 \cdot \frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\Pi^2 \cdot L}{n \cdot B} + T_{всп} \cdot n \right]. \quad (5)$$

Как видно, количество проходов круга n неоднозначно влияет на штучное время $T_{ум}$, т.е. существует экстремум функции $T_{ум}$ от n . Для его определения подчиним зависимость (5) необходимому условию экстремума $T'_{ум_n} = 0$:

$$T'_{ум_n} = z \cdot \left[- \left(\frac{\sigma}{\theta} \right)^2 \cdot \frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\Pi^2 \cdot L}{n^2 \cdot B} + T_{всп} \right]. \quad (6)$$

После несложных преобразований, получим экстремальное значение $n_{экстр}$

$$n_{экстр} = \frac{\sigma}{\theta} \cdot \Pi \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{L}{B \cdot T_{всп}}}. \quad (7)$$

Исходя из зависимости (7), экстремальное значение $n_{экстр}$ тем больше, чем больше параметры σ , Π , L и меньше θ , B и $T_{всп}$.

По знаку второй производной $T''_{ум_n}$ определим характер экстремума функции $T_{ум}$ от количества проходов круга n :

$$T''_{ум_n} = z \cdot \left(\frac{\sigma}{\theta} \right)^2 \cdot \frac{4}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{\Pi^2 \cdot L}{n^3 \cdot B} > 0. \quad (8)$$

Поскольку вторая производная положительна, то в точке экстремума имеет место минимум функции $T_{шт}$. Подставляя зависимость (7) в (5), определим минимальное значение функции $T_{шт}$:

$$T_{шт_{мин}} = z \cdot n_{эксп} \cdot (T_{всп} + T_{всп}) = 2z \cdot \frac{\sigma}{\theta} \cdot \Pi \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{L}{B} \cdot T_{всп}}. \quad (9)$$

Как видно, первое и второе слагаемые зависимости (9) равны между собой, т.е. равны основное и вспомогательное время обработки. Уменьшить $T_{шт_{мин}}$ можно уменьшением параметров σ , Π , L , $T_{всп}$ и увеличением θ и B . Причем, наибольший эффект достигается от уменьшения параметров σ и Π при заданной температуре шлифования θ . Параметры L , B и $T_{всп}$ влияют на $T_{шт_{мин}}$ в меньшей степени.

Подставляя зависимость (7) в (4), определим экстремальное значение $V_{дет}$:

$$V_{дет} = \frac{L}{T_{всп}}. \quad (10)$$

В данном случае скорость детали $V_{дет}$ тем больше, чем больше длина хода круга L и меньше вспомогательное время $T_{всп}$. Как видно, $V_{дет}$ не зависит от параметров σ и θ . Варьируя параметрами L и $T_{всп}$, можно в широких пределах изменять скорость детали $V_{дет}$, а соответственно количество проходов n и глубину шлифования t .

Используя полученные зависимости, произведем расчет оптимальных условий обработки применительно к плоскому шлифованию твердого сплава ВК8 торцом круга. Исходные данные для расчетов: $\rho = 14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c = 40$ кал/(кг·град); $\lambda = 14$ кал/(м·с·град); $\sigma = 10^5$ Н/мм²; $\theta = 1000^\circ\text{C}$; $\Pi = 1$ мм; $L = 100$ мм; $B = 30$ мм; $T_{всп} = 5$ с. Подставляя исходные данные в зависимости (7), (4) и $t = \Pi / n$, получено: $n_{эксп} = 10$; $V_{дет} = 1,2$ м/мин; $t = 0,1$ мм. При шлифовании сталей условное напряжение резания σ будет, естественно, меньше, поэтому будет меньше количество проходов круга n и больше глубина шлифования t .

Преобразуем зависимость (5) к виду, удобному для анализа. Для этого выразим первое слагаемое зависимости через $n_{эксп}$, определяемое зависимостью (7):

$$T_{шт} = z \cdot T_{всп} \cdot \left(\frac{n_{эксп}^2}{n} + n \right) = z \cdot T_{всп} \cdot \gamma, \quad (11)$$

где $\gamma = \left(\frac{n_{эксп}^2}{n} + n \right)$.

В табл. 1 приведены расчетные значения безразмерной величины γ в зависимости от количества проходов круга n . Как видно, с увеличением n безразмерная величина γ изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума при $n = n_{эксп} = 10$, рис. 4. Анализируя полученный график, можно сделать вывод о том, что безразмерная величина γ не столь существенно изменяется в диапазоне $n = 5 \dots 20$. Поэтому в качестве рабочего диапазона изменения n можно рекомендовать весь этот диапазон.

Таблица 1

Расчетные значения безразмерной величины γ

n	1	3	5	8	9	10	11	12	15	20	30	100
γ	101	36,3	25	20,5	20,1	20	20,1	20,3	21,7	25	33,3	101

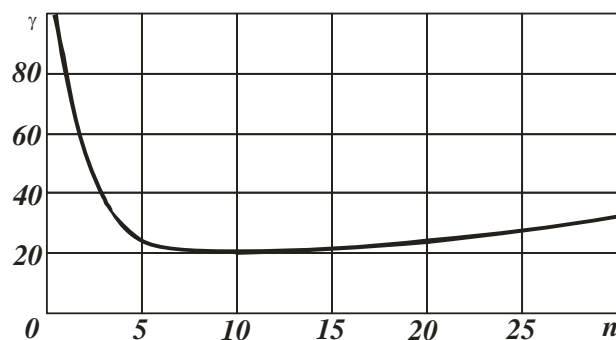


Рис. 4. Зависимость безразмерной величины γ от количества проходов круга n .

Таким образом, предложена новая методика расчета оптимальных условий обработки при шлифовании по критерию наименьшего времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования. Ее использование позволило решить задачи повышения качества и производительности обработки при шлифовании, в частности, на операциях зубошлифования в ОАО Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера", который является одним из основных производителей шахтных конвейеров. Продукция завода отличается высоким качеством изготовления и конкурентоспособностью. В значительной мере это обусловлено разработкой прогрессивных конструкций приводов шахтных конвейеров (например, планетарных редукторов мощностью более 200 кВт). Для их эффективной работы предложен ряд новых конструкторских технологических решений.

В создаваемых редукторах используются различные типы зубчатых передач: конические передачи с круговым профилем зуба; конические передачи с профилем ДВВ; цилиндрические прямозубые передачи с эвольвентным зацеплением; цилиндрические косозубые передачи с эвольвентным зацеплением; цилиндрические косозубые передачи с зацеплением Новикова.

Детали зубчатых передач (валы, валы-шестерни, колеса и т.д.) изготавливаются из низкоуглеродистых легированных сталей. Они предварительно механически обрабатываются лезвийными инструментами, затем подвергаются цементации и закалке (с использованием токов высокой частоты) до твердости *HRC* 62...65, после чего окончательно обрабатываются на финишных операциях шлифования, а при необходимости – на операциях притирки абразивным порошком.

Увеличение надежности и ресурса работы редукторов достигается за счет применения подшипников с большой несущей способностью ведущих мировых производителей (фирма "SKF", Швеция; фирма "FAG", Германия), а также за счет повышения точности изготовления передач в результате применения операции шлифования поверхности зуба, применения новых высоколегированных сталей и технологий термообработки изготовленных из них деталей.

Согласно требованиям конструкторских чертежей, зубчатые передачи (колеса, вал-шестерни) прямозубого и косозубого зацепления должны изготавливаться с 8-й степенью точности, вследствие чего возникла необходимость применения финишной операции обработки зубьев – зубошлифования [1]. На первой стадии работы использовались отечественные шлифовальные круги по ГОСТ 2424-80 типа 1 или 4 следующих характеристик: 400x32x127 $\alpha = 40^0$, 24А зернистостью 10 – 6, твердостью СМ2 – С2, структурой 8, 9. Круги рассчитаны на обеспечение шероховатости поверхности R_a не более 0,63 мкм. Обрабатываемый материал – сталь 20Х2Н4А с твердостью *HRC*, 62-65. Припуск на обработку – 0,4–1,2 мм. Режимы правки круга: глубина резания – 0,01–0,05 мм; подача – ручная; число проходов – 3; рабочая скорость круга – не более 30 м/с. Режимы шлифования: рабочая скорость круга – не более 30 м/с; скорость заготовки – 3–4 м/мин; глубина резания – 0,4–1,2 мм; скорость подачи – 0,8–1,2 м/мин; поперечная подача – 0,05мм/дв.ход.

Применение указанных абразивных кругов на операции зубошлифования показало на неудовлетворительные результаты, связанные с низким качеством обработки, обусловленным, прежде всего, недостаточной режущей способностью абразивных кругов. В связи с этим были применены абразивные круги производства Австрии следующей характеристики: 400x32x127 TIESPV=70⁰ V=4 9 (зерно) A₃ 40H 15VP 60W 40H/SAO 24 NOT PERMISSL BLBTOROFFNI. В качестве абразива в кругах используется синтетическая алюминиевая окись, связка – стекловидного состояния, связка наполнителя – окись.

Круги отличаются высоким качеством, что выражается в обеспечении высококачественной обработки (отсутствие прижогов и других температурных дефектов на обработанных поверхностях). При этом, срок работы австрийского круга до правки составляет 3 смены вместо одной смены при использовании отечественного круга. Срок работы австрийского круга до полного износа – 3 месяца, тогда как отечественного круга – 1 месяц.

ВЫВОДЫ

Предложена новая методика расчета оптимальных условий обработки (количества проходов круга, глубины шлифования, скорости детали) при многопроходном шлифовании зубчатых колес торцом круга по критерию наименьшего времени обработки, включая основное и вспомогательное время, с учетом ограничения по температуре шлифования. Ее использование позволило решить задачи повышения качества и производительности обработки на операциях зубошлифования в ОАО Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера". Благодаря применению оптимальных режимов шлифования и характеристик абразивных кругов, обладающих высокой режущей способностью, полностью исключено образование на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов, достигнуты также высокие показатели точности и шероховатости обработки.

Перечень ссылок

1. Технологія машинобудування: підручник / О.В. Якимов, В.М. Царюк, О.О. Якимов, Г.О. Оборський, В.П. Ларшин, О.В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. – 608 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов // Физические и компьютерные технологии: материалы 13-й междуна. научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8-20.
4. Новиков Ф.В., Рябенков И.А., Нежебовский В.В. Обоснование условий повышения качества обработки на основе анализа мгновенной и средней температур при шлифовании. – Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VI Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Ч. 1: Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2008. – С. 212-217.
5. Кленов О.С. Повышение эффективности операций шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов на основе уменьшения теплонапряженности процесса // Физические и компьютерные технологии: материалы 15-й междуна. научн.-техн. конф., 2-3 декабря 2009 г. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2009. – С. 203-214.