

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, И. А. РЯБЕНКОВ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В роботі аналітично визначено температуру різання при зубошліфуванні зубчастих коліс за методом профільного копіювання та науково обґрунтовано умови її зменшення до прийнятної значення за рахунок застосування високопористих абразивних кругів із двостороннім конічним профілем типу 2П. Розрахунково-експериментальним шляхом визначено оптимальні параметри режиму шліфування, які дозволяють знімання всього припуску (0,4 мм) здійснювати за один прохід круга за схемою плоского глибокого шліфування з невеликою швидкістю деталі (3 м/хв), а остаточну обробку - за кілька проходів круга за схемою багатопрохідного шліфування зі збільшеною швидкістю деталі. Розрахунками встановлено, що запропонована аналітична залежність для визначення температури різання достатньо об'єктивно відображає закономірності формування якості обробки при шліфуванні.

Ключові слова: зубошліфування, метод профільного копіювання, температура різання, тепловий потік, високопористі абразивні круги, глибоке шліфування, багатопрохідне шліфування

В работе аналитически определена температура резания при зубошлифовании зубчатых колес по методу профильного копирования и научно обоснованы условия ее уменьшения до приемлемого значения за счет применения высокопористых абразивных кругов с двухсторонним коническим профилем типа 2П. Расчетно-экспериментальным путем определены оптимальные параметры режима шлифования, позволяющие съём всего припуска (0,4 мм) производить за один проход круга по схеме плоского глубокого шлифования с небольшой скоростью детали (3 м/мин), а окончательную обработку – за несколько проходов круга по схеме многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали. Расчетами установлено, что предложенная аналитическая зависимость для определения температуры резания достаточно объективно отражает закономерности формирования качества обработки при шлифовании.

Ключевые слова: зубошлифование, метод профильного копирования, температура резания, тепловой поток, высокопористые абразивные круги, глубинное шлифование, многопроходное шлифование.

The paper analytically determined cutting temperature for gear grinding of gears according to the method of profile copy and scientifically substantiated conditions reduce it to an acceptable level through the application of highly abrasive wheels with double-sided conical profile type 2P. Settlement and experimentally determined the optimal parameters of the grinding mode, allowing removal of all allowance (0.4 mm) to produce a single run laps around the circuit of the flat deep grinding with small parts speed (3 m / min), and final treatment - a few passes over the circle multipass grinding circuit with the increased speed of parts. Calculations revealed that the proposed analytical dependence for determining the temperature of cutting quite objectively reflects the regularities of formation of quality in grinding processing.

Keywords: tooth-grinding, profile backup method, cutting temperature, heat flux, highly porous grinding wheels, creep feed grinding, grinding multipas.

Постановка проблеми. Зубчатые колеса являются одними из основных деталей машин, которые широко применяются в современном машиностроении. Вместе с тем, они являются и одними из наиболее трудноизготавливаемых деталей машин в связи с высокими требованиями к точности и качеству обработки сложнопрофильных рабочих поверхностей. В особой мере это относится к операциям зубошлифования, на которых окончательно формируются параметры точности и качества обрабатываемых поверхностей и которые характеризуются чрезвычайно высокой трудоемкостью [1]. Уменьшить трудоемкость обработки можно применением технологии зубошлифования по методу профильного копирования [2]. В этом случае съём припуска происходит, по сути, по схеме глубокого (однопроходного) шлифования, что снижает вспомогательное время обработки, связанное с реверсированием стола станка, по сравнению со съёмом припуска по схеме многопроходного шлифования. В результате может быть увеличена производительность обработки. Однако, как известно [2], данный метод зубошлифования характеризуется относительно низкой точностью обработки. В этом отношении зубошлифование по методу обкатывания считается более эффективным. Вместе с тем, проведенные экспериментальные исследования технологических закономерностей зубошлифования зубчатых колес приводов шахтных конвейеров по методу профильного копирования на зубошлифовальном станке мод. Hofler rapid 1250 [3] показали положительные результаты с точки зрения повышения производи-

тельности обработки. Это открывает новые возможности интенсификации процесса зубошлифования. Однако для этого необходимо знать рациональные параметры режима резания, характеристики абразивных кругов и другие условия обработки, гарантированно обеспечивающие выполнение высоких требований по качеству обрабатываемых поверхностей при одновременном увеличении производительности обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. В отличие от зубошлифования зубчатых колес по методу обкатывания, их зубошлифованию по методу профильного копирования в научно-технической литературе уделено значительно меньше внимания [1-4]. Это связано с тем, что точность обработки для данного метода ниже, чем для зубошлифования по методу обкатывания [2]. Поэтому эффективной областью применения зубошлифования по методу профильного копирования является обработка зубчатых колес невысокой точности (7–8 степени точности), а эффективной областью применения зубошлифования по методу обкатывания – обработка ответственных зубчатых колес (4–7 степени точности). Основная причина низкой точности обработки зубьев колес при зубошлифовании по методу профильного копирования состоит в том, что в связи с увеличением глубины шлифования (по сравнению с зубошлифованием по методу обкатывания) существенно увеличиваются силы резания, которые приводят к значительным погрешностям обработки и соответственно снижению точности обрабатываемых поверхностей. Естествен-

внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании, поскольку в основу решения сложных дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных положены функции распределения, которые изменяются в неограниченных пределах, а это приводит к неопределенности решений по определению глубины внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании. Исходя из этого, возникает необходимость в разработке упрощенной математической модели определения температуры резания при шлифовании с целью определения рациональных параметров режимов шлифования и характеристик круга для заданной температуры резания.

Для этого в основу расчетов может быть положена схема плоского шлифования (рис. 1,б), принимаемая в первом приближении, что все тепло, возникающее в процессе резания, идет на нагревание обрабатываемой детали. В последующих расчетах необходимо учитывать тепло, уходящее в образующиеся стружки. Это позволит достаточно правильно аналитически описать закономерности формирования температуры резания при шлифовании.

В данной работе расчет температуры резания в процессе шлифования производится на основе расчетной схемы, в которой снимаемый припуск представлен в виде множества элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые за время перемещения из точки А в точку А' перерезаются со скоростью $V_{рез}$ шлифовальным кругом, вращающимся со скоростью $V_{кр}$, при скорости перемещения детали $V_{дет}$ (рис. 1,б). На каждый адиабатический стержень (стенки которого изолированы) действует тепловой источник плотностью q , что приводит к распространению тепла лишь вдоль адиабатического стержня без учета распространения тепла в образующиеся стружки.

Температура резания θ при шлифовании может быть описана зависимостью:

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

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;

l_2 – глубина внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании, м;

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К.

Как видно, уменьшить температуру резания θ при шлифовании можно двумя путями: уменьшением плотности теплового потока q или уменьшением l_2 . Однако, эти параметры взаимозависимы между собой и поэтому для определения условий уменьшения температуры резания θ необходимо установить функциональные связи между параметрами q и l_2 .

Плотность теплового потока q определяется зависимостью:

$$q = \frac{N}{F} = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн} \cdot V_{кр}}{F}, \quad (2)$$

где $N = P_z \cdot V_{кр}$ – мощность шлифования, Вт;

F – площадь контакта круга с обрабатываемым материалом, м²;

$P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$ – тангенциальная составляющая силы резания при шлифовании, Н;

σ – условное напряжение резания, Н/м²;

$S_{мгн}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²;

$V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

Параметр $S_{мгн} = Q / V_{кр}$, где Q – производительность обработки, м³/с. Тогда

$$q = \frac{\sigma \cdot Q}{F}. \quad (3)$$

Уменьшить плотность теплового потока q можно уменьшением условного напряжения резания σ , производительности обработки Q и увеличением площади контакта круга с обрабатываемым материалом F . Из этого вытекает эффективность перехода от шлифования периферией круга к шлифованию торцом круга, поскольку площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью во втором случае значительно больше, а это ведет к уменьшению плотности теплового потока q .

Очевидно, уменьшить производительность обработки Q экономически нецелесообразно, гораздо эффективнее уменьшать условное напряжение резания σ путем обеспечения высокой режущей способности круга, снижая трение в зоне резания за счет применения эффективных технологических сред и т.д.

Важным условием уменьшения условного напряжения резания σ является и использование прерывистого шлифования, которое за счет ударного характера взаимодействия круга с обрабатываемой деталью обеспечивает поддержание на его рабочей поверхности развитого режущего рельефа и снижение энергоемкости обработки.

При традиционном многопроходном шлифовании периферией круга параметр $F = H \cdot l$, где H – ширина шлифования, м; l – длина дуги контакту круга с обрабатываемой деталью, м. В свою очередь, производительность обработки $Q = H \cdot V_{дет} \cdot t_{ф}$, где $V_{дет}$ – скорость перемещения детали, м/с; $t_{ф}$ – фактическая глубина шлифования, м. Тогда зависимость (3) примет вид:

$$q = \frac{\sigma \cdot V_{дет} \cdot t_{ф}}{l}, \quad (4)$$

$$\text{где } l = \sqrt{\frac{2 \cdot t_{\phi}}{\left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дем}}\right)}};$$

$R_{кр}$, $R_{дем}$ – соответственно, радиусы круга и детали, м.

При плоском шлифовании $R_{дем} \rightarrow \infty$, тогда:

$$q = \sigma \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t_{\phi}}{2 \cdot R_{кр}}}. \quad (5)$$

Как видно, плотность теплового потока q в меньшей мере зависит от глубины шлифования t_{ϕ} , чем от скорости перемещения детали $V_{дем}$. При этом плотность теплового потока q уменьшается с увеличением радиуса круга $R_{кр}$.

Проведем теоретический анализ глубины внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании l_2 , т.е. параметра, который входит в зависимость (1) и аналитически описывается:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau, \quad (6)$$

где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

τ – время контакта круга с фиксированным сечением обрабатываемой поверхности, с.

Как видно, единственно возможным условием уменьшения параметра l_2 является уменьшение времени контакта круга с фиксированным сечением обрабатываемой поверхности τ . Исходя из этого, эффективно применение многопроходного шлифования, которое характеризуется достаточно высокой скоростью перемещения детали $V_{дем}$, поскольку

$$\tau = \frac{l}{V_{дем}} = \sqrt{2 \cdot t_{\phi} \cdot R_{кр}} \cdot \frac{1}{V_{дем}}. \quad (7)$$

Уменьшить время τ можно так же за счет уменьшения фактической глубины шлифования t_{ϕ} и применения прерывистого шлифования.

Подставляя зависимости (5), (6) и $t_{\phi} = t / \sin \alpha / 2$ в зависимость (1), получена обобщенная зависимость для определения температуры резания:

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{V_{дем} \cdot t}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{R_{кр} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}}. \quad (8)$$

Согласно данной зависимости, наибольшее влияние на температуру резания θ при шлифовании оказывает условное напряжение резания σ . Поэтому основной эффект при снижении температуры резания θ при шлифовании может быть достигнут за счет уменьшения условного напряжения резания σ путем обеспечения высокой режущей способности круга, применяя для этого эффективные методы правки или обеспечивая работу круга в режиме интенсивного самозатачивания.

С учетом удельной производительности обработки $Q_{yд} = V_{дем} \cdot t$ зависимость (8) опишется:

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{Q_{yд}}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{R_{кр} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}}. \quad (9)$$

Как видно, при заданном значении $Q_{yд}$ эффективно номинальную глубину шлифования t уменьшать, т.е. применять схему многопроходного шлифования. Это второе основное условие уменьшения температуры резания θ при шлифовании. Однако эффект от выполнения этого условия не столь значителен, так как номинальная глубина шлифования t входит в зависимость (9) в небольшой степени – 0,25. Это указывает на целесообразность уменьшения температуры резания θ за счет уменьшения условного напряжения резания σ .

В условиях заданной удельной производительности обработки $Q_{yд} = V_{дем} \cdot t$ параметр l_2 равен:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \frac{t}{Q_{yд}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot R_{кр}}{\sin \frac{\alpha}{2}}}. \quad (10)$$

Однако, уменьшить параметр l_2 и тем самым возможную глубину дефектного слоя обработанной детали, обусловленную температурным фактором, можно уменьшением номинальной глубины шлифования t и увеличением скорости перемещения детали $V_{дем}$, т.е. применением многопроходного шлифования. Отсюда следует, что использование многопроходного шлифования позволяет решить две важных задачи: уменьшить температуру резания θ и глубину проникновения тепла в поверхностный слой обра-

тываемой детали при шлифовании l_2 с целью повышения качества обработанной детали.

Произведем количественную оценку температуры резания θ при шлифовании абразивным кругом формы 2П по зависимости (8) для исходных данных: обрабатываемый материал – сталь 18ХГН2МФБ; $\sigma = 1,5 \cdot 10^4$ Н/мм²; $c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град); $\lambda = 42$ Вт/(м·град); $\alpha = 60^\circ$; $t = 0,01$ мм; $V_{dem} = 10$ м/мин.

Расчетами установлено, что $\theta = 240$ °С. Следовательно, при многопроходном шлифовании температура резания принимает небольшое значение, что не приводит к снижению качества обработки из-за образования температурных дефектов.

Как видно, предложенная зависимость для определения температуры резания достаточно объективно отражает закономерности формирования качества обработки при шлифовании.

В работе [3] показано, что образование прижогов на обрабатываемой поверхности при шлифовании данного материала абразивным кругом 2П 400х32х127 24А 10 СМ2 8 К6 происходит при предельных значениях номинальной глубины шлифования $t = 0,07$ мм и скорости детали $V_{dem} = 12$ м/мин. Согласно зависимости (8), для этих значений глубины шлифования и скорости детали температура резания $\theta = 1131$ °С. Вполне очевидно, что превышение этой температуры резания может приводить к возникновению прижогов и других температурных дефектов на обрабатываемой поверхности.

Как отмечалось выше, уменьшить температуру резания θ при шлифовании и повысить производительность обработки можно уменьшением условного напряжения резания σ , применяя для этого высокопористые абразивные круги. Экспериментально установлено [3], что при шлифовании высокопористым кругом T1ESP 400х32х127 93A46M15WPG11W (производство компании "Винтертур") условное напряжение резания σ может быть уменьшено в 2 раза. Это означает, что при скорости детали $V_{dem} = 3$ м/мин предельная номинальная глубина шлифования t может быть увеличена до величины снимаемого припуска (например, до 0,4 мм) при обеспечении температуры резания $\theta = 1045$ °С, установленной на основе зависимости (8). В результате появляется возможность реализации процесса зубошлифования зубчатых колес по методу профильного копирования, осуществляемого, по сути, по схеме глубинного шлифования с более высокой производительностью обработки (по сравнению с зубошлифованием по методу обкатывания), достигаемой главным образом за счет уменьшения количества проходов круга и снижения вспомогательного времени обработки.

Несомненно, увеличение номинальной глубины шлифования t до величины снимаемого припуска, согласно зависимости (10), приводит к увеличению глубины внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании l_2 . Однако, как установлено экспериментально, при этом на обрабатываемых поверхностях отсутствуют прижоги и другие температурные дефекты, т.к. температура ре-

зания $\theta = 1045$ °С ниже критического значения. Поэтому необходимо первый проход круга осуществлять по схеме плоского глубинного шлифования с небольшой скоростью детали (3 м/мин), а последующие проходы круга при окончательной обработке (2 – 3 прохода) – по схеме многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали.

Выводы. В работе аналитически определена температура резания при зубошлифовании зубчатых колес по методу профильного копирования и научно обоснованы условия ее уменьшения до приемлемого значения за счет применения высокопористых абразивных кругов с двухсторонним коническим профилем типа 2П. Расчетно-экспериментальным путем определены оптимальные параметры режима шлифования, позволяющие съем всего припуска (0,4 мм) производить за один проход круга по схеме плоского глубинного шлифования с небольшой скоростью детали (3 м/мин), а окончательную обработку – за несколько проходов круга по схеме многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали. Это обеспечивает увеличение производительности обработки по сравнению с зубошлифованием по методу обкатывания. Расчетами установлено, что предложенная аналитическая зависимость для определения температуры резания достаточно объективно отражает закономерности формирования качества обработки при шлифовании и поэтому может быть использована для анализа и проектирования эффективных технологических процессов финишной абразивной обработки.

Список литературы

1. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с.
2. Кацук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кацук, А.Б. Верещакгин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
3. Нежебовський В. В. Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шквотних конвеєрів на операціях зубошлифування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В.В. Нежебовський. – Одеса: ОНПУ, 2011. – 21 с.
4. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
5. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
6. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
7. Силли С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силли. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
8. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.

References (transliterated)

1. Yakimov A.V. Abrasive diamond processing shaped surfaces. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 212 p.
2. Kashuk V.A., Vereshagin A.B. Spravochnik shlifovshika [Manual grinder]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 480 p.
3. Nezhbovskiy V. V. Tekhnologichne zabezpechennya yakosti obrobky zubhastykh kolic privodiv shakhtnykh konveeriv na operatsiyakh zuboshlifuvannya: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 "Tekhnologiya mashinobuduvannya" [Technological support processing quality gears drive shaft conveyors in operations zuboshlifuvannya: Author. Dis. on competition sciences. degree candidate. Sc. Sciences specials. 05.02.08 "Mechanical Engineering"]. Odesa: ONPU Publ., 2011. 21 p.

4. *Starkov V.K.* Shlifovanie vysokoporistymi krugami [Highly porous grinding circles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 688 p.
5. *Reznikov A.N.* Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov [Thermal physics processes of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 279 p.
6. *Yakimov A.V.* Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Optimization of the grinding process]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 175 p.
7. *Silin S.S.* Metod podobiya pri rezanii materialov [Similarity method in cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 152 p.
8. *Evseev D. G.* Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke [Formation properties of the surface layers with abrasion]. Saratov: Sarat. un-t Publ., 1975. 127 p.

Поступила (received) 07.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Підвищення ефективності операцій зубошліфування зубчастих коліс / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 138–144. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

Повышение эффективности операций зубошлифования зубчатых колес / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 138–144. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

Improved gear grinding gears / F. V. Novikov, I. A. Ryabekov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.138–144. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Novikov Fedor Vasiliviyth – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Рябенков Ігор Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків; тел.: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com.

Рябенков Игорь Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков; тел.: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com.

Ryabekov Igor Aleksandrovith – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasilenko, Kharkiv; tel.: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com.