

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИВОДОВ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Нежебовский В.В., канд. техн. наук
(ПАО «Свет шахтера», Харьков, Украина)

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, проф.

(Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Харьков, Украина)

Определены оптимальные условия обработки при зубошлифовании зубчатых колес приводов шахтных конвейеров с учетом ограничений по температуре резания, точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. Установлено, что повысить качество обработки можно за счет уменьшения условного напряжения резания путем снижения интенсивности трения в зоне резания и повышения режущей способности круга. Показано, что наименьшее штучное время обработки для заданной температуры шлифования достигается при условии равенства основного и вспомогательного времени. Обоснованы возможности уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании кругом с двухсторонним коническим профилем.

Ключевые слова: *зубошлифование, температура резания, качество обработки, точность обработки, шероховатость обрабатываемых поверхностей, условное напряжение резания, круг с двухсторонним коническим профилем.*

Визначено оптимальні умови обробки при зубошліфуванні зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів з урахуванням обмежень за температурою різання, точністю та шорсткістю оброблюваних поверхонь. Встановлено, що підвищити якість обробки можна за рахунок зменшення умовного напруження різання шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання і підвищення різальної здатності круга. Показано, що найменший штучний час обробки для заданої температури шліфування досягається за умови рівності основного і допоміжного часу. Обґрунтовано можливості зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні кругом з двостороннім конічним профілем.

Ключові слова: *зубошліфування, температура різання, якість обробки, точність обробки, шорсткість оброблюваних поверхонь, умовне напруження різання, круг з двостороннім конічним профілем*

The optimum processing conditions during gear grinding gear drive shaft conveyors with the restrictions on the cutting temperature, accuracy and surface roughness. It is found that to increase the processing quality can be conditioned by reducing the cutting voltage by reducing the intensity of friction in the cutting zone of the cutting wheel and increase capacity. It is shown that the smallest single-piece processing time for a given temperature grinding is achieved under the condition of equality of the main and auxiliary time. Possibilities of reducing the surface roughness in grinding disc with double-sided conical profile.

Keywords: *tooth-grinding, cutting temperature, the quality of treatment, precision machining, surface roughness, conventional stress cutting circle with two-sided conical profile.*

Постановка проблемы. При изготовлении приводов шахтных конвейеров постоянно возникают сложные задачи технологического обеспечения качества обработки зубчатых колес на финишных операциях. В значительной степени это обусловлено проблемами образования на операциях зубошлифования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях, а также относи-

тельно низкими показателями точности и шероховатости обработки. В результате происходят частые поломки зубьев колес, снижается их износостойкость и долговечность, а это требует постоянного ремонта приводов в тяжелых шахтных условиях. Известно, что повысить качество обработки зубчатых колес и, соответственно, их надежность, и ресурс работы можно путем применения эффективных технологий зубошлифования, обеспечивающих снижение тепловой и силовой напряженности процесса и повышение производительности обработки. В настоящее время накоплен богатый опыт совершенствования технологии зубошлифования, получено большое количество результатов экспериментальных исследований и в целом сложилось достаточно полное представление о технологических возможностях и имеющихся резервах зубошлифования [1–3]. Вместе с тем, для их максимального использования необходимы новые более глубокие теоретические знания о критериях определения оптимальных режимов шлифования с учетом ограничений по температуре шлифования, точности и шероховатости обработки, поскольку имеющихся экспериментальных данных все же недостаточно для принятия решения о выборе оптимального варианта обработки. Все это требует проведения исследований по установлению технологических закономерностей формирования качества обработки зубчатых колес приводов шахтных конвейеров и условий их повышения на операциях зубошлифования. Целью работы является повышение качества обработки зубчатых колес приводов шахтных конвейеров на финишных операциях на основе научно обоснованного выбора оптимальных режимов зубошлифования и характеристик абразивных кругов.

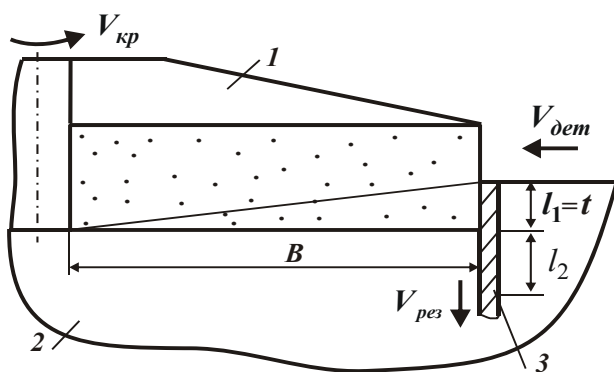


Рис. 1 – Расчетная схема торцевого шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень.

Для обоснования условий повышения качества и производительности обработки при зубошлифования по температурному фактору установлена аналитическая связь между температурой шлифования θ и глубиной l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при торцевом шлифовании (рис. 1) [4]:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{l_1}{l_2}, \quad (1)$$

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot V_{рез} \cdot l_1} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot Q_{уд}}, \quad (2)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м² (энергоемкость обработки, Дж/м³); τ – время обработки, с; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К; l_1 – толщина слоя снятого материала, равная при торцевом шлифовании глубине шлифования t , м; $V_{рез} = t \cdot V_{дем} / B$ – скорость перерезания адиабатического стержня, которыми условно представлен снимаемый припуск, м/с;

$V_{дет}$ – скорость перемещения детали, м/с; B – длина рабочей части круга (длина контакта круга с деталью), м; $Q_{уд} = t \cdot V_{дет}$ – удельная производительность обработки, м²/с.

Как вытекает из зависимости (1), уменьшение θ предполагает увеличение глубины l_2 . Следовательно, единственно возможным путем одновременного уменьшения параметров θ и l_2 и, таким образом, повышения качества обработки является уменьшение условного напряжения резания σ в результате снижения интенсивности трения в зоне шлифования и повышения режущей способности круга. Расчетами установлено, что при шлифовании стали ШХ15 ($c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/м³·град) отношение l_1/l_2 принимает значения, меньшие единицы (рис. 2,а). Установлено также, что обеспечение значений θ , меньших температуры плавления стали ШХ15 ($\theta_{пл} = 1500$ °С), возможно при $l_1/l_2 \ll 1$ (рис. 2,б). Это связано с относительно большими значениями $\sigma = \sigma_{сж} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{ш}^2}\right) / K_{ш}$, где $K_{ш} = P_z / P_y = 0,1 \dots 1$; P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м² (для стали ШХ15 $\sigma_{сж} = 2 \cdot 10^9$ Н/м²). Поэтому весьма сложно одновременно уменьшить температуру шлифования θ до требуемого уровня и выполнить условие $l_1/l_2 \rightarrow 1$ и таким образом добиться повышения качества обработки. Реально можно выполнить лишь одно условие: уменьшить θ за счет увеличения l_2 . В этом случае исключается образование на обрабатываемых поверхностях прижогов. Однако, в связи с увеличением l_2 возможны структурные изменения поверхностного слоя обрабатываемой детали, которые не всегда можно устранить на последующем проходе круга, т.к. $l_1/l_2 \ll 1$. Поэтому, наряду с обеспечением заданного значения θ , необходимо стремиться к уменьшению параметра l_2 за счет уменьшения условного напряжения резания σ .

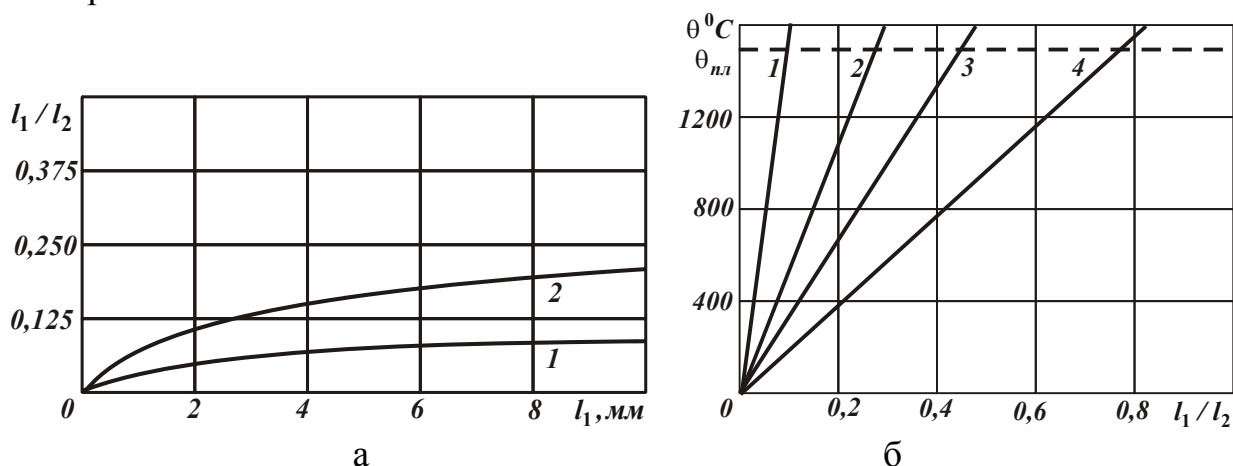


Рис. 2 – Зависимости l_1/l_2 от l_1 (1 – $V_{рез} = 2$ мм/мин; 2 – $V_{рез} = 10$ мм/мин) (а) и θ от l_1/l_2 (1 – $K_{ш} = 0,1$; 2 – $K_{ш} = 0,3$; 3 – $K_{ш} = 0,5$; 4 – $K_{ш} = 1$) (б).

При шлифовании на обрабатываемых поверхностях, кроме прижогов, образуются микротрещины из-за высокого градиента температуры:

$$\text{grad}\theta = \frac{\theta}{l_2} = \sigma \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot V_{\text{дет}} . \quad (3)$$

Уменьшить $\text{grad}\theta$ и исключить образование микротрещин, исходя из зависимости (3), можно уменьшением температуры шлифования θ и увеличением глубины l_2 , что соответствует установленному выше условию исключения прижогов и достигается уменьшением параметров σ , t , $V_{\text{дет}}$ и увеличением B . Следовательно, добиться одновременного уменьшения $\text{grad}\theta$, температуры шлифования θ и глубины l_2 и таким образом исключить образование микротрещин и прижогов на обрабатываемой поверхности (при заданной производительности обработки) можно лишь за счет уменьшения условного напряжения резания σ . В связи с этим произведена оптимизация параметров режимов зубошлифования с учетом температурного фактора. Как следует из зависимостей (1) и (2), уменьшить 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, это ведет к увеличению вспомогательного времени, связанного с реверсированием стола станка. Поэтому существует оптимальное количество проходов круга n , при котором штучное время $T_{\text{шт}}$ (равное сумме основного $T_{\text{осн}}$ и вспомогательного $T_{\text{всп}}$ времени обработки на операции зубошлифования) принимает минимальное значение:

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{осн}} + T_{\text{всп}} = 2 \cdot z \cdot n \cdot k \cdot (\tau_{\text{осн}} + \tau_{\text{всп}}) = 2 \cdot z \cdot k \cdot \tau_{\text{всп}} \cdot \gamma, \quad (4)$$

где $T_{\text{осн}} = 2 \cdot z \cdot n \cdot k \cdot \tau_{\text{осн}}$; $T_{\text{всп}} = 2 \cdot z \cdot n \cdot k \cdot \tau_{\text{всп}}$; z – количество зубьев; k – количество двойных возвратно-поступательных движений круга вдоль обрабатываемого зуба за один проход; $\tau_{\text{осн}} = L/V_{\text{дет}}$ – основное время обработки за один двойной ход круга, с; L – длина продольного хода круга, м; $\tau_{\text{всп}}$ – вспомога-

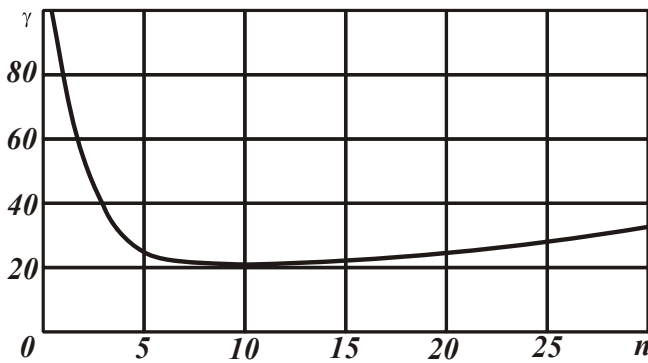


Рис. 3 – Зависимость γ от n
для $n_{\text{экстр}} = 10$.

тельное время обработки за один двойной ход круга, с;

$\gamma = \left(\frac{n_{\text{экстр}}^2}{n} + n \right)$ – безразмерная величина.

Подчиняя зависимость (4) необходимому условию экстремума $T'_{\text{шт}n} = 0$, определены экстремальные значения $n_{\text{экстр}}$, $V_{\text{дет}}$ и минимальное значение $T_{\text{шт}}$:

$$n_{\text{экстр}} = \frac{\sigma}{\theta} \cdot \Pi \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{L}{B \cdot \tau_{\text{всп}}}}; \quad (5)$$

$$V_{\text{дет}} = \frac{L}{\tau_{\text{всп}}}; \quad (6)$$

$$T_{умmin} = 2 \cdot z \cdot k \cdot n_{экстр} \cdot (\tau_{всн} + \tau_{всн}) = 4 \cdot z \cdot k \cdot \frac{\sigma}{\theta} \cdot \Pi \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{L}{B} \cdot \tau_{всн}} \quad (7)$$

Первое и второе слагаемые зависимости (7) равны между собой, т.е. равны основное $\tau_{осн}$ и вспомогательное $\tau_{всн}$ время обработки. Уменьшить $T_{умmin}$ можно прежде всего уменьшением параметров σ и Π при заданном значении θ . При этом экстремальное значение $V_{дем}$ тем больше, чем меньше вспомогательное время $\tau_{всн}$. Для исходных данных: $\rho=14,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c=40$ кал/(кг·град); $\lambda=14$ кал/(м·град); $\sigma=10^5$ Н/мм²; $\theta=1000$ °С; $\Pi=0,4$ мм; $L=100$ мм; $B=30$ мм; $\tau_{всн}=1$ с, учитывая $t = \Pi / n$, получено: $n_{экстр}=9$; $V_{дем}=6$ м/мин; $t=0,045$ мм. Из рис. 3 следует, что безразмерная величина γ несущественно изменяется в диапазоне $n=5 \dots 20$. Это свидетельствует об эффективности съема припуска за небольшое количество проходов круга (в пределах 5 проходов).

Определены также условия одновременного обеспечения требований по точности и качеству обработки при шлифовании, обусловленные заданными значениями величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, и температуры шлифования θ :

$$y = \frac{P_y}{C} = \frac{\sigma}{C \cdot K_{ш}} \cdot \frac{h \cdot t \cdot V_{дем}}{V_{кр}}; \quad (8)$$

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{дем}}{B}}, \quad (9)$$

где C – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; h – ширина шлифования, м; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

Исходя из зависимостей (8) и (9), это достигается уменьшением параметров σ , t , $V_{дем}$ и соответственно производительности обработки. Причем, для обеспечения заданной величины y требуется более существенное уменьшение производительности обработки. Это предполагает применения как предварительного, так и окончательного шлифования. При предварительном шлифовании целесообразно обеспечить заданную температуру θ за счет выбора оптимальной глубины шлифования t , удовлетворяющей зависимости (9). При окончательном шлифовании необходимо обеспечить заданную величину y , устанавливая глубину шлифования t в соответствии с зависимостью $y = t / \varepsilon$, и количество проходов n при выхаживании в соответствии с зависимостью $y = t / \varepsilon^n$, где $\varepsilon = (1 + \alpha)$ – уточнение; $\alpha = \frac{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot h \cdot V_{дем}}$ – безразмерный параметр.

Расчетами установлено, что с увеличением величин n и α (уменьшением $V_{дем}$) в одинаковое количество раз (что соответствует одинаковому уменьшению производительности обработки) безразмерная величина y/t уменьшается с разной интенсивностью (рис. 4,а). Более интенсивно – с увеличением n . Это свидетельствует об эффективности применения схемы выхаживания по сравнению с шлифованием по жесткой схеме. Установлено также, что при начальном

значении $\alpha = \alpha_0 \geq 1$ величина y/t с увеличением n уменьшается более чем по линейной зависимости (рис. 4,б). Это превосходит интенсивность уменьшения величины y/t в зависимости от n при условии уменьшения глубины шлифования t . Поэтому при $\alpha < 1$ (или $\varepsilon < 2$) целесообразно использовать шлифование по жесткой схеме, а при $\alpha \geq 1$ (или $\varepsilon \geq 2$) – шлифование по схеме выхаживания, исключая таким образом из технологического процесса операцию окончательного шлифования. Из этого вытекает, что коэффициент α , а, следовательно, и уточнение $\varepsilon = (1 + \alpha)$ определяют оптимальный маршрут обработки. Однако для этого необходимо располагать еще и количественными значениями уточнения ε , которые устанавливаются расчетно-экспериментальным путем.

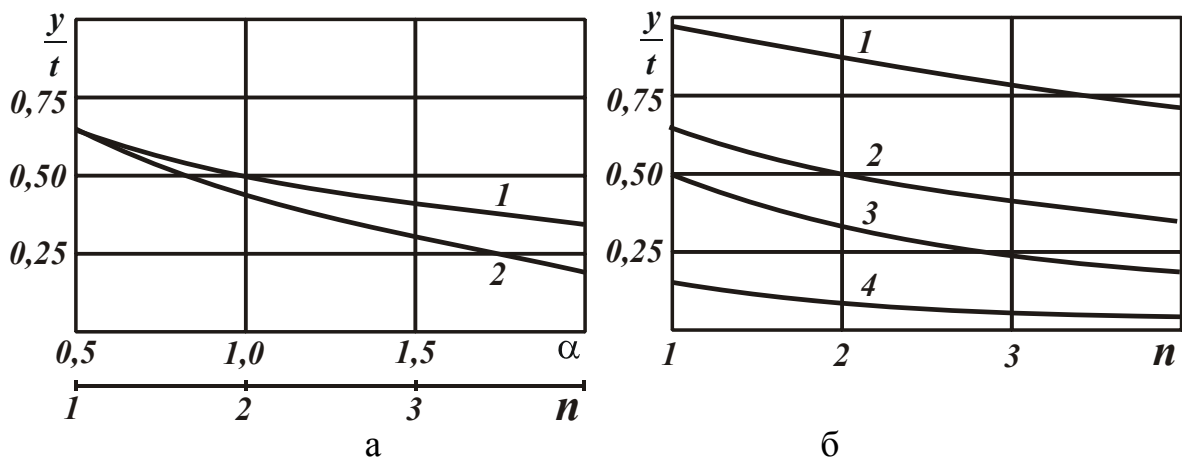


Рис. 4 – Зависимость y/t от величин α (1) и n (2) для $\alpha_0 = 0,5$ (а) и зависимость y/t от n при выхаживании (б): 1 – $\alpha_0 = 0,1$; 2 – $\alpha_0 = 0,5$; 3 – $\alpha_0 = 1$; 4 – $\alpha_0 = 5$.

Используя расчетную схему (рис. 5) [5], обоснованы закономерности съема припуска и формирования шероховатости поверхности с учетом вероятностного характера участия зерен в резании, для чего аналитически определена функция $\Phi(y)$ распределения неудаленного материала на обработанной поверхности при обработке одновысотными (1) и разновысотными (3) зернами с учетом вероятности их участия в резании (рис. 6), а также при обработке одновысотными зернами (2), но без учета вероятностного характера участия их в резании.

В первом случае $\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}$, а параметры шероховатости определяются: $R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n}$; $\frac{R_a}{a} = 0,734$; $\frac{R_p}{R_a} = \frac{R_{\max} - a}{R_a} = \frac{R_{\max}}{R_a} - \frac{a}{R_a}$, где 2γ – угол при вершине конусообразного режущего зерна; n – количество зерен; B – ширина обработки, м; y – текущая координата профиля, м; b – максимальная высота выступания зерен над уровнем связки инструмента, м; a – расстояние до средней линии профиля, м.

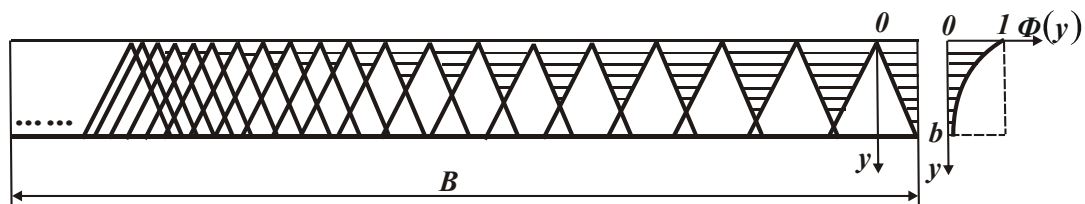


Рис. 5 – Расчетная схема параметров шероховатости поверхности.

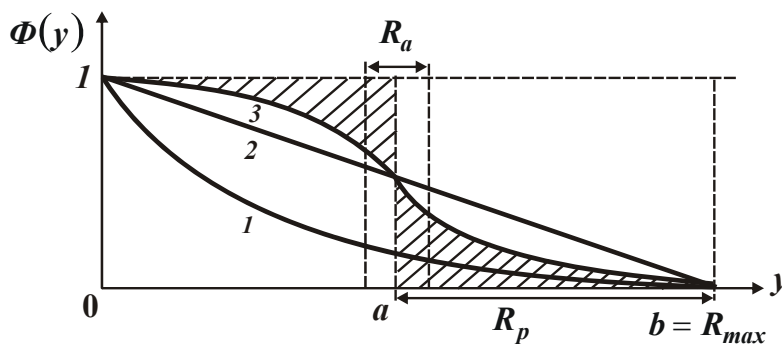


Рис. 6 – Характер изменения функции $\Phi(y)$.

В третьем случае функция $\Phi(y)$ также описывается экспоненциальной зависимостью, а во втором случае – простой линейной зависимостью. По структуре построения функция $\Phi(y)$ соответствует классической относительной опорной длине микропрофиля обработанной поверхности.

В первом и третьем случаях параметр шероховатости R_{max} однозначно определить нельзя, т.к. вероятностная функция $\Phi(y)$ асимптотически приближается к нулевому значению (рис. 6). Поэтому установить параметр шероховатости R_{max} можно из условия прочности образующейся микронеровности поверхности. На этой основе определена длина площадки на вершине микронеровности $l = \frac{0,5 \cdot P \cdot \text{ctg} \gamma}{\tau_{сдв}}$, где P – сила резания, приходящаяся на единицу ширины микронеровности, Н/м; $\tau_{сдв}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, Н/м²; 2γ – угол при вершине микронеровности. Из приведенной зависимости вытекает, что чем больше отношение $P/\tau_{сдв}$, тем меньше параметр R_{max} и отношение R_{max}/R_a . Этим объясняется различие шероховатости поверхности при абразивной обработке разных по физико-механическим свойствам материалов. Следовательно, существуют два подхода к определению параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке. Первый подход состоит в кинематико-геометрическом описании профиля поверхности с учетом вероятностного наложения и перекрытия проекций зерен, второй подход – в описании профиля микронеровностей от их разрушения под действием сил, возникающих в процессе резания. Первый подход позволяет установить отношение a/R_a , а второй – отношение R_{max}/R_a . В итоге формируется достаточно полное представление о структуре шероховатого слоя обработанной поверхности.

Таблица 1

Расчетные значения параметров R_a/a , R_{max}/R_a , R_p/R_a и R_p/a

Наименование параметров	Случай 1	Случай 2	Случай 3
R_a/a	0,734	0,5	< 0,5
R_{max}/R_a	> 4	4	4...8
R_p/R_a	> 3	2	< 2...6
R_p/a	> 2,2	1	< 1..3

В табл. 1 в обобщенном виде приведены расчетные значения параметров шероховатости поверхности для трех рассмотренных выше случаев (рис. 6). Как видно, случай 2 занимает промежуточное положение, т.к. с переходом от случая 1 к случаю 3 отношение R_a/a уменьшается, а отношение R_{max}/R_a проходит точку минимума, равную 4. Случай 2 является своего рода границей, разделяющей случаи 1 и 3. Сравнивая экспериментальные или расчетные значения отношений R_a/a , R_{max}/R_a , R_p/R_a и R_p/a с соответствующими значениями для случая 2, можно оценить структуру шероховатого слоя поверхности, образующегося для конкретного метода обработки.

Для определения технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке первоначально выполнен расчет параметров шероховатости поверхности при шлифовании плосковершинными зернами. Установлено, что при обработке одновысотными и разновысотными зернами параметр R_a определяется зависимо-

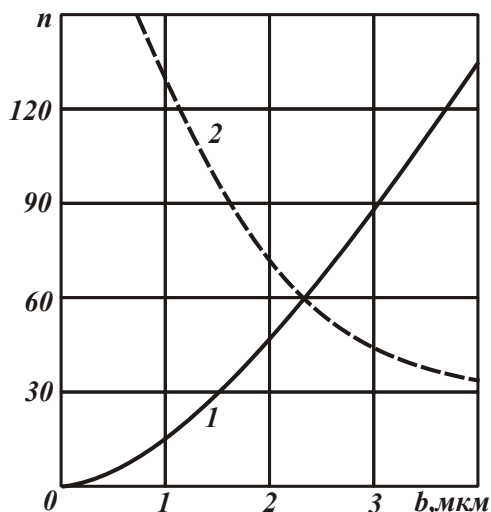


Рис. 7 – Зависимость достигаемого (1) и необходимого (2) количества зерен n от b .

стиями $R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n} \cdot e^{-\frac{x \cdot n}{B}}$; $R_a = \frac{0,734 \cdot B \cdot b}{n \cdot x}$, где x – длина площадки на зерне, м.

При шлифовании периферией круга количество зерен n , участвующих в формировании шероховатости поверхности (достигаемое количество), равно

При шлифовании периферией круга количество зерен n , участвующих в формировании шероховатости поверхности (достигаемое количество), равно

При шлифовании периферией круга количество зерен n , участвующих в формировании шероховатости поверхности (достигаемое количество), равно

$$n = B \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot b} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \frac{3 \cdot m \cdot b}{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3}, \quad (10)$$

где $R_{кр}$ – радиус круга, м; m – объемная концентрация зерен круга; \bar{X} – зернистость круга, м.

Установлено, что количество зерен, необходимое для формирования полного профиля обрабатываемой поверхности $\Phi(y = b = R_{max}) = 0,1$, равно

$$n = \frac{6,9 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot b}. \quad (11)$$

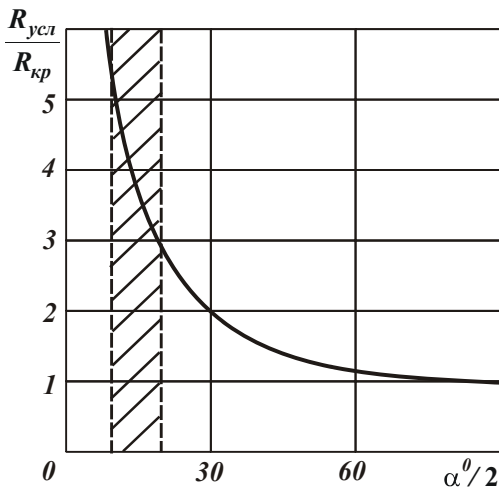


Рис. 8 – Зависимость отношения $R_{усл} / R_{кр}$ от угла $\alpha/2$

Из сопоставления достигаемого (10) и необходимого (11) количества зерен n (рис. 7) определяется параметр шероховатости $b = R_{max}$, который потенциально может быть реализован при шлифовании, например, для исходных данных: $B=20$ мкм; $V_{кр}=30$ м/с; $V_{дет}=1$ м/мин; $R_{кр}=100$ мм; $m=100$; $\bar{X}=100$ мкм. В этом состоит новизна предложенного расчета параметров шероховатости поверхности при шлифовании. На его основе обоснованы закономерности съема припуска и формирования шероховатости поверхности при шлифовании кругом с двухсторонним коническим профилем и углом при вершине α . Доказано, что в этом случае условный радиус шлифования $R_{усл}$ (конической части круга) больше радиуса круга $R_{кр}$ и определяется

$$R_{усл} = \frac{R_{кр}}{\sin \alpha / 2}. \quad (12)$$

Это означает, что при шлифовании данным кругом (по сравнению с шлифованием периферией круга) в формировании шероховатости поверхности участвует большее количество зерен. А это ведет к уменьшению шероховатости поверхности. При условии $\alpha/2=10...20^{\circ}$ (что имеет место на практике) условный радиус $R_{усл}$ может быть увеличен в 3...5,5 раз (рис. 8). При условии $\alpha/2 \rightarrow 0^{\circ}$ условный радиус $R_{усл} \rightarrow \infty$. В результате приходим к шлифованию торцом круга, обеспечивающим наименьшую шероховатость поверхности. Таким образом показано, что увеличение угла $\alpha/2$ предполагает переход от шлифования периферией круга к шлифованию кругом с двухсторонним коническим профилем и в последствии к шлифованию торцом круга (рис. 9). При этом эффект уменьшения шероховатости поверхности достигается без увеличения площадок износа на зернах круга, что является, например, основным условием уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании периферией круга. Это свидетельствует о том, что шлифование торцовым и конусным кругами может осуществляться острыми зёрнами, обеспечивая этим высокую режущую способность круга и соответственно высокие показатели производительности и качества обработки. Важным является и то, что для уменьшения шероховатости поверхности не обязательно уменьшать зернистость круга (как при шлифовании периферией круга), а это создает дополнительные резервы повышения эффективности шлифования.

Следовательно, применение шлифование торцовым и конусным кругами является одним из основных направлений повышения качества и производительности обработки на операциях зубошлифования, возможности осуществления финишной обработки без применения последующих трудоемких операций доводки свободным абразивом.

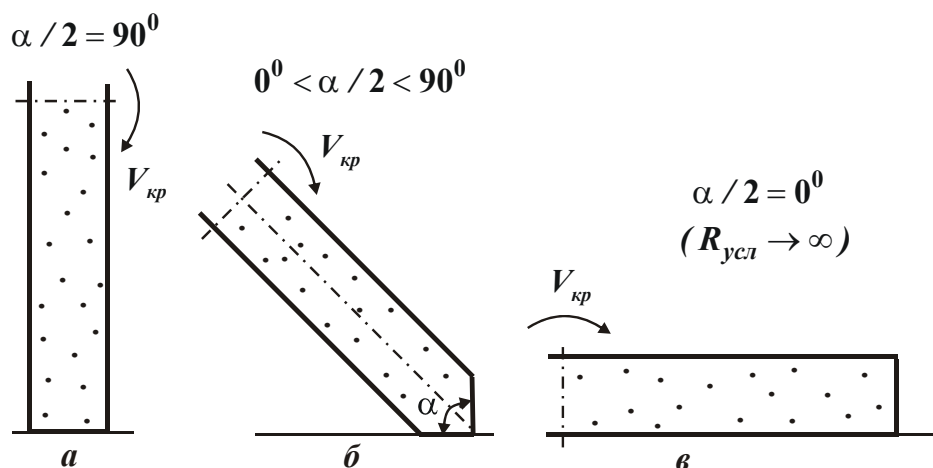


Рис. 9 – Схема перехода от шлифования периферией круга (а) к шлифованию кругом с двухсторонним коническим профилем (б) и к шлифованию торцом круга (в)

Проведены работы по разработке и внедрению в производство эффективных операций зубошлифования зубчатых колес приводов шахтных конвейеров [6]. Экспериментально установлено, что при шлифовании стали 18ХГН2МФБ твердостью $HRC\ 57\dots 63$ энергоемкость обработки (условное напряжение резания) σ изменяется в пределах $1311,7\dots 1696,4$ кГс/мм², а отношение l_1/l_2 , установленное расчетно-экспериментальным путем (рис. 10), равно $l_1/l_2 < 0,2$. Поэтому на каждом последующем проходе круга нельзя устранить нарушенный

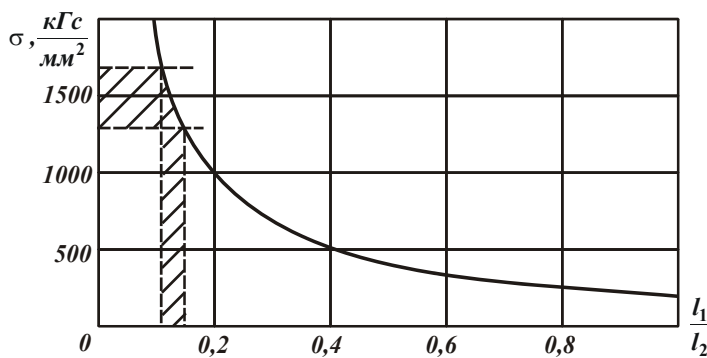


Рис. 10 – Зависимость σ от l_1/l_2 для $\theta=800\ ^\circ\text{C}$

на предыдущем проходе (в результате теплового воздействия) поверхностный слой детали. Повысить качество обработки в этих условиях можно лишь за счет уменьшения температуры шлифования θ путем уменьшения энергоемкости обработки, что достигается применением кругов с более высокой режущей способностью.

Используя экспериментальные значения энергоемкости обработки, произведены расчеты по зависимостям (5) и (6) оптимальных параметров режима шлифования зубчатого колеса из стали 18ХГН2МФБ твердостью $HRC\ 57\dots 63$ по критерию наименьшего штучного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования θ .

Теоретически установлено, что при зубошлифовании на станке мод. 5843ЕМ (работающим по методу обкатывания кругом конического профиля) абразивным кругом 2П 400x32x127 24А10СМ2К6 съем припуска 0,4 мм может быть произведен за 5 проходов круга с глубиной шлифования $t=0,08$ мм и скоростью детали $V_{дет}=12$ м/мин. Исходные данные для расчета: $c \cdot \rho=5 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град); $\lambda=42$ Вт/(м·град); $\sigma=15 \cdot 10^3$ Н/мм²; $\theta=800\ ^\circ\text{C}$; $\Pi=0,4$ мм; $L=100$ мм; $\tau_{всп}=0,5$ с; $B=6,32$ мм.

Экспериментальные исследования показали, что исключить образование прижогов на обрабатываемой поверхности при шлифовании данным кругом можно при глубине шлифования не более 0,07 мм (рис. 11). Это указывает на незначительное расхождение расчетных и экспериментальных данных (до 15 %) и свидетельствует о достоверности полученных теоретических решений. Экспериментально установлено, что шлифование кругом T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W, обладающим повышенной режущей способностью, позволяет увеличить предельную глубину шлифования и скорость круга (при которых исключается образование на обрабатываемых поверхностях прижогов) соответственно до значений 0,15 мм и 40 м/с. Следовательно, применение дан-

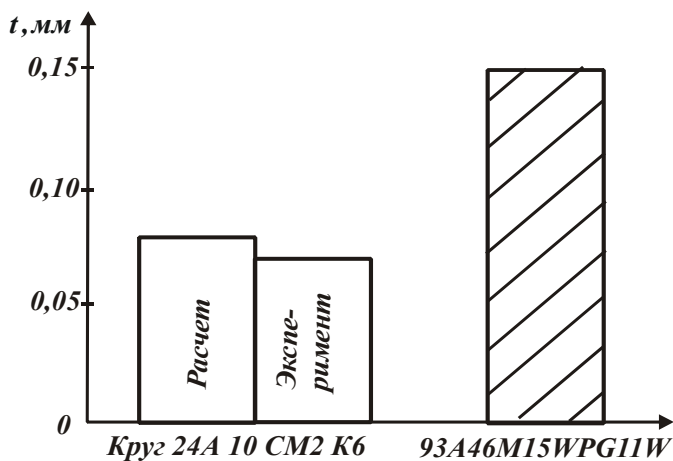


Рис. 11 – Расчетные и экспериментальные значения предельной глубины шлифования t

ного круга позволяет съём заданного припуска 0,4 мм осуществить за 4 прохода, гарантированно исключая образование прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях. При этом увеличиваются стойкость круга между правками с одной до трех смен и срок работы круга до его полного износа с одного до трех месяцев. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении производительности обработки и о возможности реализации установленного теоретически

наименьшего штучного времени обработки для заданной температуры шлифования. Экспериментально установлено, что с уменьшением глубины шлифования энергоёмкость обработки σ увеличивается, а уточнение ε уменьшается (рис. 12). Это вытекает также из приведенной выше зависимости

$$\frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дет}}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot (\varepsilon - 1) = 1, \quad (13)$$

т.е. чем больше энергоёмкость обработки σ , тем меньше уточнение ε . Этим, собственно, объясняется высокая трудоёмкость достижения на практике повышенных показателей точности обработки за счет уменьшения глубины шлифования. Из этого также вытекает, что наиболее полное представление о физической сущности и технологических возможностях шлифования можно получить на основе анализа по зависимости (13) двух взаимосвязанных между собой параметров: энергоёмкости обработки и уточнения, которые определяют силовую напряженность шлифования в направлении действия тангенциальной и радиальной составляющих силы резания.

Экспериментально установлено, что применение абразивного круга с двухсторонним коническим профилем типа 2П при зубошлифовании на указанных выше режимах резания позволяет стабильно обеспечить параметр шероховатости обработки $R_a < 0,6$ мкм.

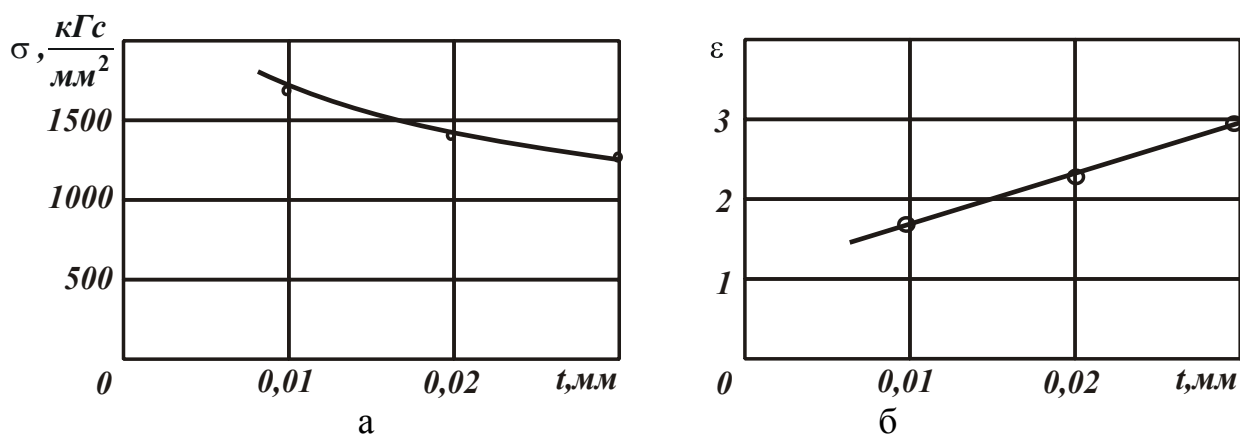
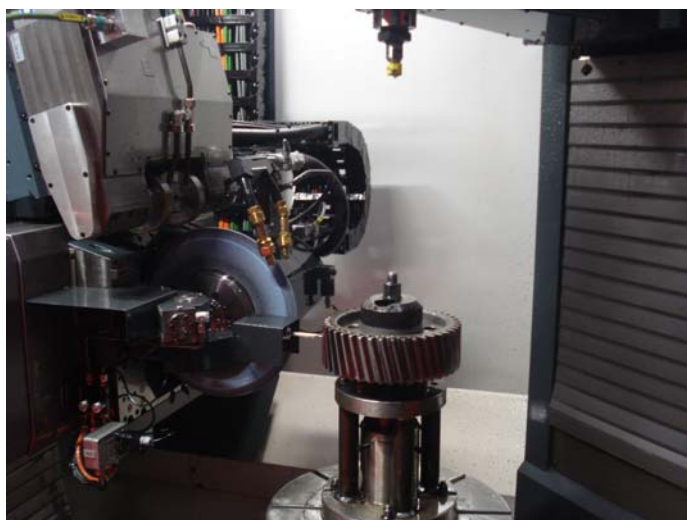


Рис. 12 – Зависимости σ (а) и ε (б) от глубины шлифования t

Для измерения параметров точности обработки зубчатых колес применена современная координатно-измерительная машина (КИМ) GLOBAL Perfomance 122210 производства итальянской фирмы DEA (концерн Hexagon). Установлено, что при этом существенно сокращается время и повышается точность и стабильность измерений, снижается потребность в дополнительной контрольной оснастке, появляется возможность измерения тех размеров, которые ранее имеющимися техническими средствами не могли быть измерены. Разработаны "Правила пользования протоколами КИМ для зубчатых передач", которые позволяют учесть разницу в данных между стандартом ISO и действующими ГОСТами, по которым разрабатывается заводская техническая документация. Установлено также, что, используя результаты измерений зубчатых колес с помощью координатно-измерительной машины, можно сократить сроки и повысить качество и надежность наладки зубошлифовального станка с целью обеспечения требований по точности обработки зубчатых колес. Это позволяет уменьшить количество проходов при окончательном шлифовании и выхаживании и снизить до 2-х раз трудоемкость обработки. Так, установлено, что съем припуска величиной 0,4 мм может быть произведен за 3 черновых прохода, 1 чистовой проход и 1 проход при выхаживании. Согласно действующей технологии, обработка производится за 5 черновых проходов, 2 чистовых и 1–2 прохода при выхаживании.

Полученные в работе результаты исследований были также использованы для выбора оптимальных условий обработки при зубошлифовании на станке мод. HOFLER RAPID 1250, обеспечивающим шлифование по методу профильного копирования за счет применения специального профильного абразивного круга (рис. 13).

Разработанные операции зубошлифования зубчатых колес внедрены в основное производство ПАО "Свет шахтера" на 4-х зубошлифовальных станках. При этом гарантированно обеспечиваются требования по качеству, точности и шероховатости ($R_a < 0,6$ мкм) обрабатываемых поверхностей зубчатых колес приводов шахтных конвейеров, что позволило повысить надежность и ресурс их работы до уровня мировых производителей аналогичной продукции.



а



б

Рис. 13 – Обработка на зубошлифовальном станке модели HOFLEER RAPID 1250 (а) и общий вид круга для шлифования по методу профильного копирования (б)

Выводы. В работе определены оптимальные условия обработки для зубошлифования зубчатых колес приводов шахтных конвейеров с учетом ограничений по температуре резания, точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей. Установлено, что повысить качество обработки можно исключительно за счет уменьшения условного напряжения резания путем снижения интенсивности трения в зоне резания и повышения режущей способности круга. Показано, что наименьшее штучное время обработки для заданной температуры шлифования достигается при условии равенства основного и вспомогательного времени. Обоснованы возможности уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании кругом с двухсторонним коническим профилем и показано, что эффект обработки достигается за счет увеличения условного радиуса шлифования. Доказано, что применение кругов с повышенной режущей способностью при зубошлифовании позволяет снизить до 2-х раз трудоемкость обработки, гарантированно исключая образование прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Качество изготовления зубчатых колес / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1979. – 279 с. 2. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с. 3. Сильвестров Б.Н. Зубошлифовальные работы: учеб. пособие / Б.Н. Сильвестров. – М.: Высшая школа, 1985. – 272 с. 4. Новиков Ф.В. Теоретическое обоснование путей уменьшения температуры при шлифовании / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский, А.Н. Ковальчук, Е.И. Иванов // Вісн. НТУ"ХП". Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХП". – 2010. – № 25. – С. 83-91. 5. Нежебовский В.В. Выбор оптимальных условий шлифования по критерию шероховатости поверхности / В.В. Нежебовский // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2009. – Вип. 81. – С. 151-158. 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.