

УДК 621.923

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИВОДОВ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, **Нежебовский В.В.**

*(Харьковский национальный экономический университет;
ОАО Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера")*

Введение и постановка задачи. При производстве 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 относительно 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, 2]. 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 правильного принятия решения о выборе оптимального варианта обработки. Все это требует проведения дальнейших исследований по установлению технологических закономерностей формирования параметров качества обработки зубчатых колес приводов шахтных конвейеров и условий их повышения на операциях зубошлифования.

Цель работы – обоснование условий повышения качества, точности и производительности обработки зубчатых колес приводов шахтных конвейеров на операциях зубошлифования.

Материалы и результаты исследований. Для достижения поставленной цели первоначально были проведены экспериментальные исследования основных параметров обработки при плоском шлифовании на плоскошлифовальном станке мод. 3Г71 (с использованием абразивного круга 1А1 250х15х76 24А 40 СМ1 К6) специально изготовленных пластин из закаленной стали 18ХГН2МФБ

твердостью HRC 57...63 с шириной шлифования $B=12$ мм, скоростью круга $V_{кр}=35$ м/с и скоростью детали $V_{дет}=4,2$ м/мин при различных глубинах резания (за один проход круга). Шлифование осуществлялось без применения СОЖ.

На рис. 1 приведены экспериментальные значения отношения фактической и номинальной глубин шлифования t_{ϕ}/t в зависимости от номинальной глубины шлифования t . Фактическая глубина шлифования t_{ϕ} равна разности номинальной глубины шлифования (устанавливаемой по лимбу станка) и величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе. Как видно, с увеличением t отношение t_{ϕ}/t уменьшается. Это свидетельствует о том, что с увеличением t величина упругого перемещения в меньшей мере влияет на изменение t_{ϕ} . На рис. 1,г показан характер изменения величины упругого перемещения y с увеличением t . В отличие от отношения t_{ϕ}/t , величина y увеличивается с увеличением t , что ведет к снижению точности обработки. С этой точки зрения глубина шлифования t должна быть ограничена. Уточнение $\varepsilon = t/y$ (рис. 1,в) увеличивается с увеличением глубины шлифования t и принимает значения в пределах 1,67...3.

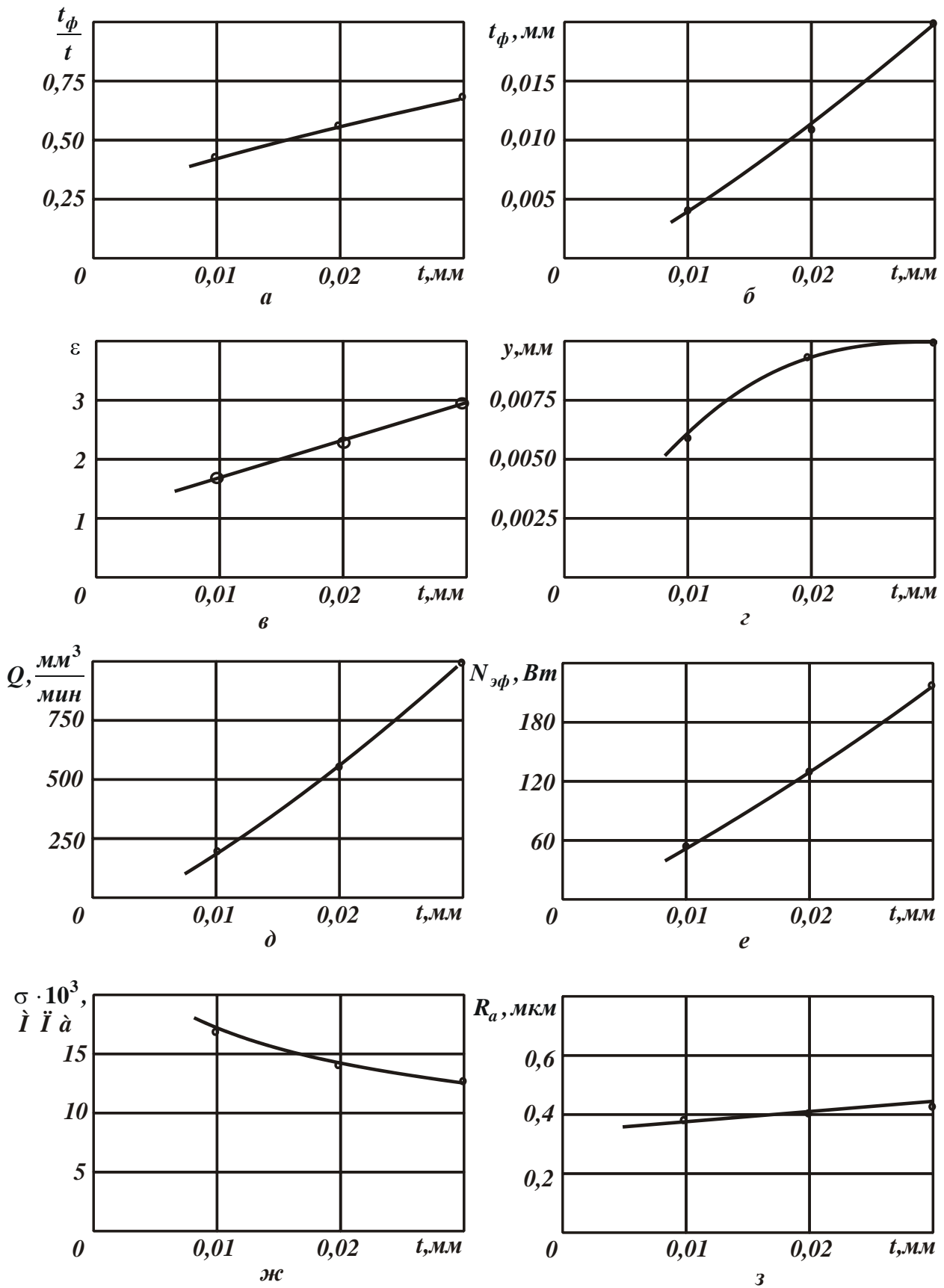


Рис. 1. Зависимости параметров t_ϕ/t (а), t_ϕ (б), ε (в), y (г), Q (д), $N_{\text{эф}}$ (е), σ (ж), R_a (з) от номинальной глубины шлифования t .

Расчетные значения параметра σ (в $\text{кГс}/\text{мм}^2$) для $c \cdot \rho = 0,5 \text{ кГс}/(\text{мм}^2/\text{град})$

l_1/l_2 \ θ , град	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
700	1750	875	437,5	291,7	218,8	175
800	2000	1000	500	33,5	250	200
1000	2500	1250	625	416,5	312,5	250

На рис. 1 показан характер изменения эффективной мощности шлифования $N_{\text{эф}}$ и производительности обработки $Q = B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t_{\text{ф}}$, в зависимости от t . Как видно, оба параметра увеличиваются с увеличением t примерно с одинаковой интенсивностью. Энергоемкость обработки (условное напряжение резания) σ несущественно уменьшается с увеличением глубины шлифования t .

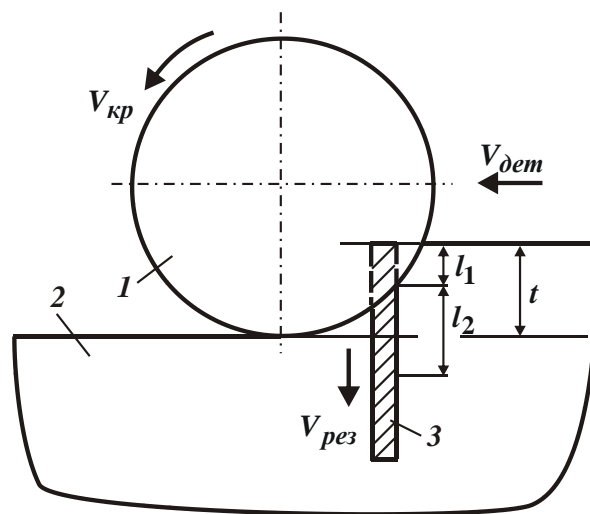


Рис. 2. Расчетная схема плоского шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – адиабатический стержень.

В табл. 1 приведены рассчитанные значения энергоемкости обработки $\sigma = 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \theta / (l_1/l_2)$ при шлифовании стали 18ХГН2МФБ для различных температур шлифования θ и отношений l_1/l_2 , где $l_1 \leq t$ – длина срезанной части адиабатического стержня, которыми условно представлен снимаемый припуск, м (рис. 2 [3]); l_2 – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м. Значения температуры $\theta = 700 \dots 1000^\circ\text{C}$ соответствуют критической температуре шлифования, при достижении которой на обрабатываемой поверхности образца, изготовленного из стали 18ХГН2МФБ, образуются прижоги. Сравнивая значения энергоемкости обработки σ , приведенные на рис. 1, ж и в табл. 1, видно, что установленные экспериментально значения σ реализуются при относительно небольших значениях $l_1/l_2 = 0,1 \dots 0,2$. Графически характер изменения параметра σ от отношения l_1/l_2 при условии $\theta = 800^\circ\text{C}$ показан на рис. 3. Как видно, экспериментально установленные значения $\sigma = (13,117 \dots 16,964) \cdot 10^3 \text{ МПа}$ (рис. 1, ж) реализуется при $l_1/l_2 < 0,2$. Следовательно, одновременно уменьшить

температуру шлифования θ до требуемого уровня (приблизительно 800°C) и выполнить условие $l_1/l_2 \rightarrow 1$ не представляется возможным. Реально можно лишь уменьшить θ до требуемого значения за счет существенного уменьшения отношения $l_1/l_2 \ll 1$ и увеличения глубины l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. А это исключает возможность удаления на каждом последующем проходе круга поверхностного слоя обрабатываемой детали, подвергнутого на предшествующем проходе тепловому воздействию на глубину l_2 . Поэтому задача обеспечения бездефектной обработки сводится к уменьшению температуры шлифования θ до требуемого уровня, что достигается реализацией условия $l_1/l_2 < 0,2$. Это требует установления оптимальных значений глубины шлифования t и скорости детали V_{dem} , согласно зависимости [4]: $\frac{l_1}{l_2} = t \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2\lambda} \cdot \frac{V_{dem}}{B}}$, где c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град).

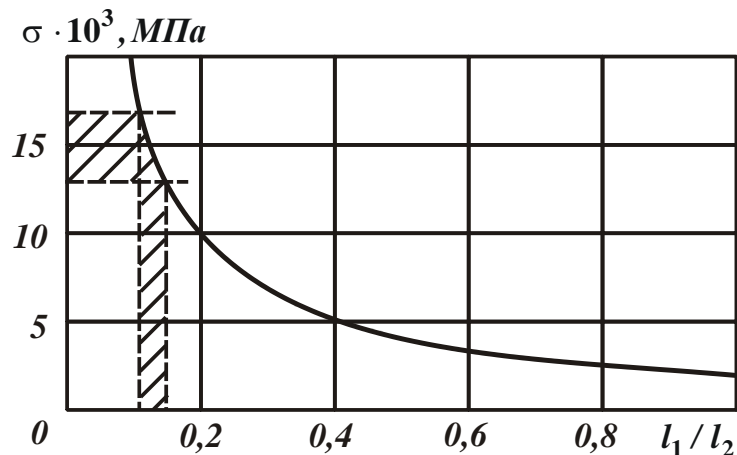


Рис. 3. Зависимость энергоемкости обработки (условного напряжения резания) σ от отношения l_1/l_2 для $\theta=800^{\circ}\text{C}$.

Используя приведенные на рис. 1 экспериментальные значения энергоемкости обработки (условного напряжения резания) σ и уточнения ε , установим взаимосвязь между ними на основе зависимости [5]:

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

Из зависимости (1) следует, что чем больше σ , тем меньше ε . Данная закономерность также вытекает из рис. 1: при $t=0,01$ мм энергоемкость обработки σ больше, а уточнение ε меньше, чем при $t=0,03$ мм. Следовательно, теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Увеличение σ и уменьшение ε с уменьшением глубины шлифования t (рис. 4) указывает на низкую эффективность финишных операций шлифования с точки зрения показателей точности и трудоемкости обработки. Обеспечение высоких показателей точности обработки предполагает увеличение трудоемкости, что подтверждается практическими данными.

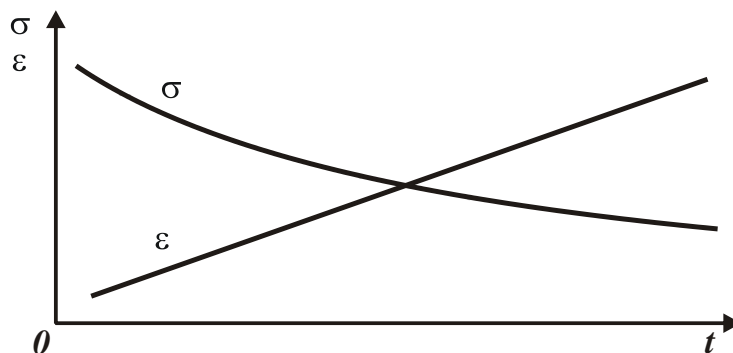


Рис. 4. Характер изменения параметров σ и ε от глубины шлифования t .

Необходимо отметить, что в научно-технической литературе анализ взаимосвязи между параметрами σ и ε не проводился. Поэтому выявленная в настоящей работе связь между данными параметрами может иметь большое значение при установлении новых технологических возможностей процесса шлифования. С физической точки зрения энергоемкость обработки σ определяет силовую напряженность процесса шлифования в направлении действия тангенциальной составляющей силы резания P_z , а уточнение ε определяет силовую напряженность процесса шлифования в направлении действия радиальной составляющей силы резания P_y . Исходя из этого можно заключить, что более полное представление о физической сущности и технологических возможностях шлифования можно получить лишь на основе анализа по зависимости (1) двух взаимосвязанных между собой параметров σ и ε .

В процессе исследований также проводились измерения параметра шероховатости обработанной поверхности R_a . Как следует из рис. 1,3, с увеличением t параметр R_a незначительно увеличивается (в пределах 0,5–0,6 мкм).

Экспериментально установленные значения σ при шлифовании стали 18ХГН2МФБ позволяют рассчитать оптимальные параметры режима резания многопроходного зубошлифования, обеспечивающие наименьшее штучное время обработки (представляя его как сумму основного и вспомогательного времени обработки) для заданной температуры шлифования. Для этого используем зависимости для определения экстремального количества проходов круга $n_{экстр}$ и скорости детали $V_{дет}$ [6]:

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

$$V_{дет} = \frac{L}{\tau_{всп}}, \quad (3)$$

где Π – величина снимаемого припуска, м; L – длина продольного хода круга, м; $\tau_{всп}$ – вспомогательное время обработки за один двойной ход круга, с.

Параметр B установим, исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 5:

$$B = \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot h_m}, \quad (4)$$

где $R_{кр}$ – радиус круга, м; h_m – текущее значение ширины контакта конусного круга с обрабатываемой поверхностью, м.

Таблица 2

Расчетные значения параметров B и $n_{экстр}$ для $R_{кр} = 200$ мм

h_m , мм	0,1	0,5	1,0	2,0	4,0
B , мм	6,32	14,14	20,0	28,28	40,0
$n_{экстр}$	4,22	2,82	2,36	1,98	1,67

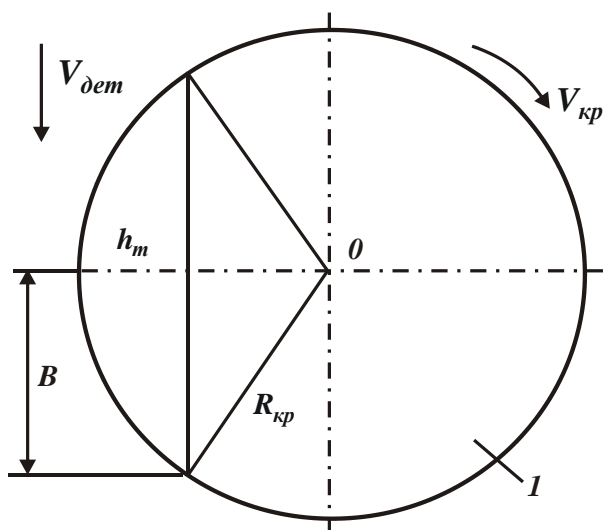


Рис. 5. Расчетная схема параметра B : 1 – шлифовальный круг.

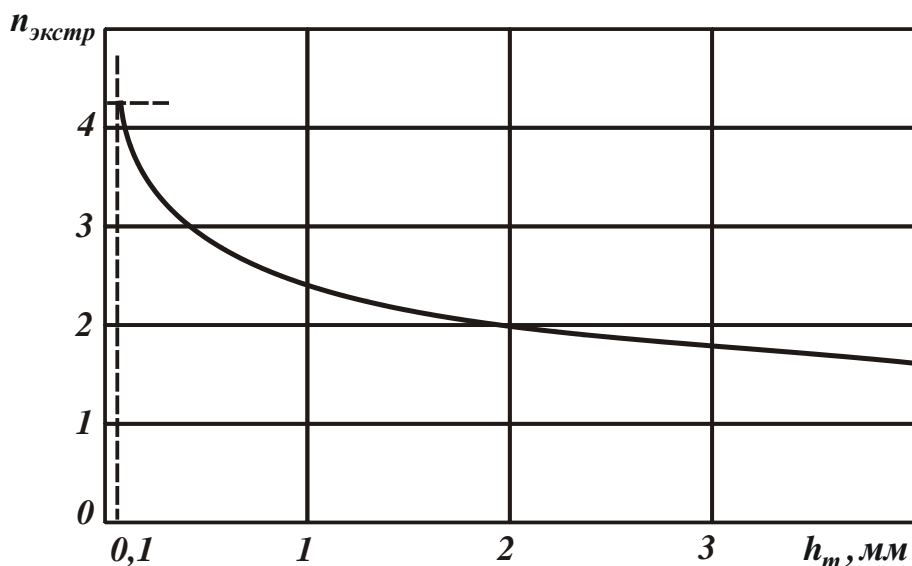


Рис. 6. Зависимость $n_{экстр}$ от h_m .

В табл. 2 приведены рассчитанные по зависимостям (2) и (4) значения параметра B и количества проходов круга $n_{экстр}$ для следующие исходных

данных: $c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град); $\lambda = 42$ Вт/(м·град); $\sigma = 15 \cdot 10^3$ МПа; $\theta = 800^\circ\text{C}$; $\Pi = 0,4$ мм; $L = 100$ мм; $\tau_{всп} = 0,5$ с.

Как видно, с уменьшением h_m параметр B уменьшается, а $n_{экстр}$ увеличивается, что свидетельствует о более высокой тепловой напряженности процесса шлифования. Следовательно, для обеспечения заданной температуры шлифования θ , исключающей образование прижогов на обрабатываемой поверхности, необходимо принимать максимальное значение $n_{экстр}$, ограничиваясь значением $h_m \approx 0,1$ мм (рис. 6). При значениях $h_m < 0,1$ мм в общем энергетическом балансе процесса шлифования будет преобладать доля энергии резания, доля энергии трения будет значительно меньше. Поэтому будет меньше тепловая напряженность процесса и вероятность появления прижогов на обрабатываемых поверхностях. Следовательно, случай $h_m \approx 0,1$ мм следует рассматривать как наиболее опасный с точки зрения образования прижогов на обрабатываемых поверхностях. Поэтому в расчетах необходимо принимать значение $n_{экстр} = 5$, тогда $t = \Pi / 5 = 0,08$ мм, а в соответствии с зависимостью (3) скорость детали будет равна $V_{дет} = 12$ м/мин.

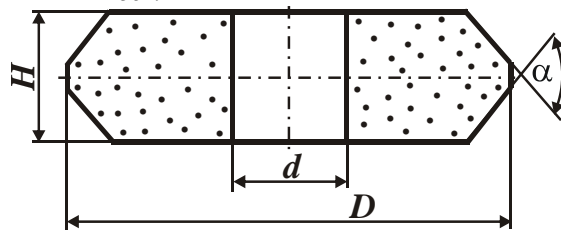


Рис. 7. Общий вид абразивного круга с двухсторонним коническим профилем типа 2П.

Для оценки достоверности теоретического решения были проведены экспериментальные исследования процесса зубошлифования на станке мод. 5843ЕМ абразивными кругами с двухсторонним коническим профилем типа 2П (рис. 7). Установлено, что при шлифовании с $t = 0,08$ мм и $V_{дет} = 12$ м/мин абразивным кругом 1А1 400х32х127 24А10СМ2К6 на обрабатываемых поверхностях образуются прижоги, исключить которые удалось уменьшением глубины шлифования до значения $t = 0,07$ мм. Таким образом доказано, что расхождение расчетных и экспериментальных значений глубины шлифования незначительно (в пределах 15%), рис. 8. Это свидетельствует о достоверности полученного теоретического решения.

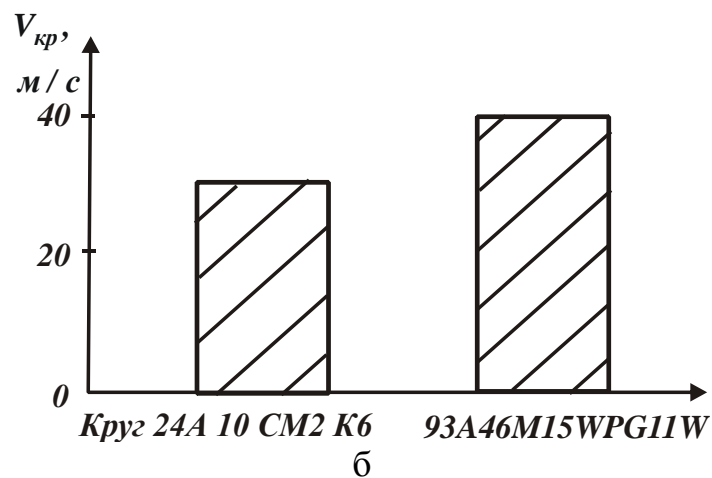
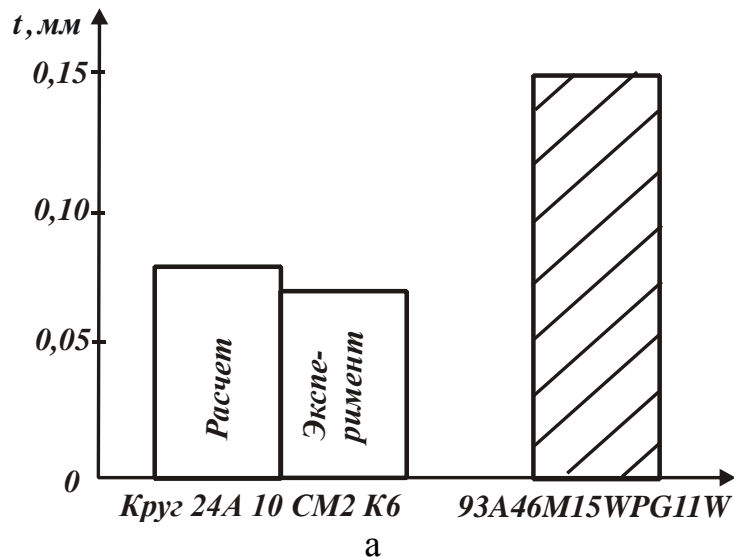


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные значения предельной глубины шлифования t (а) и экспериментальные значения предельной скорости круга $V_{кр}$, при которых образуются прижоги на обрабатываемой поверхности.

С целью определения возможностей интенсификации процесса шлифования, были проведены испытания абразивного круга T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W (производства Австрии). Установлено, что в этом случае образование прижогов на обрабатываемых поверхностях происходит при большей глубине шлифования $t=0,15$ мм (рис. 8,а). Следовательно, данный круг обладает более высокой режущей способностью по сравнению с кругом 1A1 400x32x127 24A10CM2K6, что позволяет снизить тепловую напряженность процесса шлифования и соответственно энергоемкость обработки σ . Из зависимости [4]

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot t \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2\lambda} \cdot \frac{V_{дем}}{B}}, \quad (5)$$

следует, что величина σ и глубина шлифования t в одинаковой степени влияют на температуру шлифования θ . Во сколько раз увеличивается предельная глубина шлифования t (вызывающая образование прижогов на обрабатываемой поверхности), во столько же раз уменьшается энергоемкость обработки σ при обеспечении одной и той же температуры шлифования θ . По сути, произведение параметров $\sigma \cdot t$ одинаково. Следовательно, при

шлифовании кругом T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W увеличение приблизительно в 2 раза предельной глубины шлифования предполагает уменьшение в 2 раза энергоемкости обработки σ . При этом отношение l_1/l_2 также увеличится приблизительно в 2 раза и может достигнуть значения 0,4, что существенно уменьшит глубину l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Это будет способствовать повышению качества и производительности обработки. Используя данный абразивный круг, можно съём припуска 0,4 мм произвести за 4 прохода круга. При этом, как установлено экспериментально, стойкость данного круга между правками составляет 3 смены, тогда как стойкость круга 1A1 400x32x127 24A10CM2K6 – 1 смену. Срок работы круга T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W до полного износа составляет 3 месяца, а круга 1A1 400x32x127 24A10CM2K6 – 1 месяц.

Теоретически установлено, что одновременно уменьшить температуру шлифования θ и величину упругого перемещения y (т.е. повысить качество и точность обработки) можно уменьшением энергоемкости обработки σ . Поэтому, применение круга T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W, наряду с уменьшением энергоемкости обработки, позволяет потенциально уменьшить и величину упругого перемещения y за счет снижения силовой напряженности процесса шлифования. Естественно, это будет способствовать повышению точности обработки. Кроме того, уменьшение σ , как установлено экспериментально, позволяет увеличить скорость круга с 30 до 40 м/с, что обеспечивает бесприжоговую обработку (рис. 8,б). Однако, как установлено экспериментально, достигнутые при этом параметры точности обработки все же не соответствуют заданным требованиям. Поэтому полученные результаты могут быть использованы при предварительном шлифовании (при съеме основной части припуска с обеспечением бесприжоговой обработки). Параметры точности и шероховатости должны формироваться при окончательном шлифовании, что требует контроля параметров точности обработки и подналадки станка. Учитывая сложность измерения точностных параметров зубчатых колес традиционными методами, была использована координатно-измерительная машина (КИМ) GLOBAL Perfomance 122210 производства итальянской фирмы DEA (концерн Hexagon).

Полученные результаты положены в основу разработки операций зубошлифования зубчатых колес. Обработка производится абразивными кругами T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W, характеризующимися повышенной режущей способностью и позволяющими повысить скорость резания до 40 м/с. В результате обеспечивается бездефектная обработка (исключается образование прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях) при увеличенных глубинах шлифования. Это позволяет уменьшить количество проходов круга и снизить трудоемкость обработки. Вместе с тем, после термической обработки зубчатого колеса образуются значительные погрешности, которые приводят к отклонению параметров: длины общей нормали, направления зуба, профиль эвольвенты, торцовое и радиальное биение относительно центрального отверстия и торцов ступицы

колеса. Эти погрешности не устраняются при зубошлифовании на черновых проходах. Поэтому для их устранения необходимо производить подналадку станка на основе контроля на координатно-измерительной машине фактических отклонений указанных выше точностных параметров. Данный контроль и подналадку станка следует производить после черновых проходов (перед чистовыми), а также перед выхаживанием. Окончательно контроль всех параметров в соответствии с чертежом (по ГОСТ 1643-81) следует производить после полной обработки зубчатого колеса.

Реализуя данный подход, установлено, что операция зубошлифования зубчатого колеса ($m = 10$; $z = 41$; $\beta = 15^0$; $B = 105$ мм) при съеме припуска величиной 0,4 мм может быть осуществлена за 3 черновых прохода, 1 чистовой проход и 1 проход при выхаживании. При этом обеспечивается бездефектная обработка с достижением требуемых параметров точности и шероховатости поверхности ($R_a < 0,6$ мкм). Для получения правильной формы эвольвенты зуба колеса необходимо правку круга производить перед окончательным шлифованием.

Заслуживает внимания тот факт, что при зубошлифовании абразивным кругом с двухсторонним коническим профилем типа 2П параметр шероховатости обработки R_a принимает относительно небольшие значения (в пределах 0,6 мкм) в широких диапазонах изменения параметров режимов шлифования. Следовательно, применение полученных результатов исследований позволяет уменьшить общее количество проходов и, как установлено экспериментально, снизить трудоемкость обработки до 2 раз. Повышение качества обработки зубчатых колес позволило повысить надежность и ресурс работы зубчатых передач в приводах шахтных конвейеров до уровня мировых производителей аналогичной продукции. Разработанные операции зубошлифования зубчатых колес внедрены в основное производство ОАО ХМЗ “Свет шахтера”.

Выводы. 1. Установлено, что глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали значительно превышает глубину шлифования. Поэтому удалить на последующем проходе круга поверхностный слой материала, подвергнутого тепловому воздействию на предшествующем проходе, практически невозможно. Повысить качество обработки (исключить прижоги и микротрещины) можно лишь за счет уменьшения температуры шлифования путем уменьшения энергоемкости обработки.

2. Произведены расчеты оптимальных параметров режима шлифования применительно к операции зубошлифования по критерию наименьшего штучного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования, исключающей образование прижогов на обрабатываемой поверхности. Показано незначительное расхождение расчетных и экспериментальных данных (в пределах 15%), что свидетельствует о достоверности полученных теоретических решений.

3. Экспериментально установлено, что шлифование абразивным кругом T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W, обладающим повышенной режущей

способностью, позволяет увеличить предельную глубину шлифования (исключающую образование на обрабатываемых поверхностях прижогов) до значения 0,15 мм, а также осуществить съем заданного припуска 0,4 мм за 4 прохода и увеличить скорость круга с 30 до 40 м/с. Это снижает до 2-х раз трудоемкость обработки.

4. Экспериментально установлено, что применение абразивного круга с двухсторонним коническим профилем типа 2П при зубошлифовании позволяет обеспечить требуемые значения параметра шероховатости обработки $R_a < 0,6$ мкм.

5. Обеспечение высокого качества обработки в конечном итоге позволило повысить надежность и ресурс работы зубчатых передач в приводах шахтных конвейеров до уровня мировых производителей аналогичной продукции

Список литературы

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.

2. Кашук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кашук, А.Б. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.

3. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии. Труды междунар. научн.-техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.

4. Новиков Ф.В. Теоретическое обоснование путей уменьшения температуры при шлифовании / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский, А.Н. Ковальчук, Е.И. Иванов // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”, 2010. – № 25. – С. 83-91.

5. Новиков Ф.В. Условия одновременного обеспечения требований по точности и качеству обработки при шлифовании / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 40-46.

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.