

УДК 621.923

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РЕДУКТОРОВ ПРИВОДОВ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

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

(Харьковский национальный экономический университет)

**Нежебовский В.В.**, канд. техн. наук (ПАО ХМЗ “Свет шахтера”, Харьков),

**Гершиков И.В.** (ЗАО “Азовский машиностроительный завод”, Бердянск)

*Optimal parameters and characteristics of the regime grinding abrasive wheels with the temperature factor for gear grinding operations gear reducer of underground mining*

**Актуальность задачи.** Зубчатые колеса являются наиболее ответственными деталями машин, работающими в условиях интенсивного трения и износа, к качеству изготовления которых предъявляются весьма высокие требования. В особой мере это относится к зубчатым колесам редукторов приводов шахтных конвейеров, которые работают в условиях больших нагрузок и поэтому должны обладать высоким уровнем надежности и ресурса работы. Одним из эффективных путей повышения работоспособности зубчатых колес является совершенствование операций зубошлифования, на которых окончательно формируются параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей [1, 2]. Однако, как показывает практика, обеспечить требуемое качество обработки на операциях зубошлифования достаточно сложно, что связано, прежде всего, с тепловыми явлениями, возникающими при шлифовании, и образованием на обрабатываемых поверхностях различных температурных дефектов (микротрещин, прижогов и т.д.) [3]. Это приводит к снижению ресурса работы зубчатых колес (рис. 1). В связи с этим, представляется важным и актуальным изыскание

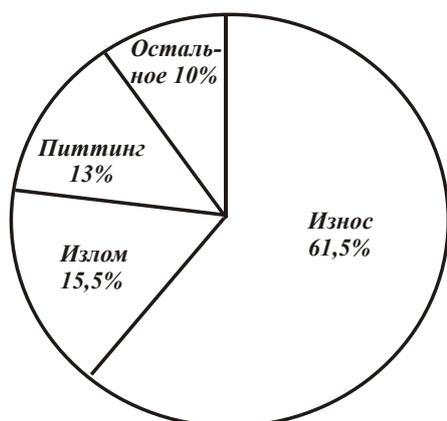


Рис. 1. Диаграмма распределения дефектов зубчатых колес при их эксплуатации.

новых технологических возможностей повышения качества и производительности обработки зубчатых колес редукторов приводов шахтных конвейеров, в частности, выпускаемых ПАО Харьковский машиностроительный завод “Свет шахтера”, который является основным производителем шахтных конвейеров в Украине. В создаваемых редукторах используются различные типы зубчатых передач:

– прямозубые и косозубые цилиндрические передачи эвольвентного зацепления с параметрами исходного контура по ГОСТ13755-81 (с параллельными осями колес);

– конические передачи с круговым зубом эвольвентного зацепления с параметрами исходного контура по ГОСТ13755-81 (с перпендику-

лярными осями колес);

– конические передачи с двояковыпуклым и двояковогнутым (ДВВ) круговым зубом эвольвентного зацепления с параметрами исходного контура по ГОСТ13755-81 (с перпендикулярными осями колес);

– эвольвентные прямозубые цилиндрические передачи с внутренним зацеплением и параметрами исходного контура по ГОСТ13755-81 (с параллельными осями колес).

Прямозубые и косозубые цилиндрические передачи применяются в одноступенчатых цилиндрических редукторах с прямозубыми и косозубыми колесами. Конические передачи с круговым зубом совместно с прямозубыми и косозубыми цилиндрическими передачами – в трехступенчатых коническо-цилиндрических редукторах с косозубыми и прямозубыми колесами мощностью 55–250 кВт. Конические передачи с двояковыпуклым и двояковогнутым (ДВВ) круговым зубом – в редукторных приставках БПЗ15К. Эвольвентные прямозубые цилиндрические передачи с внутренним зацеплением применяются в планетарных двухступенчатых редукторах мощностью 250–400 кВт, управляемых многоскоростных дифференциально-планетарных блоках приводов, двухступенчатых редукторах мощностью 200–250 кВт (для приводов конвейеров) и трехступенчатых редукторах мощностью 75–90 кВт (для приводов вынесенной подачи комбайнов).

Цель работы – повышение качества и производительности обработки зубчатых колес редукторов на основе научно обоснованного выбора оптимальных режимов резания и характеристик абразивных кругов.

**1. Математическая модель.** Для определения температуры при зубошлифовании  $\theta$  рассмотрена расчетная схема торцевого шлифования, где снимаемый припуск представлен пакетом элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые перерезаются шлифовальным кругом со скоростью  $V_{рез} = t \cdot V_{дет} / B$  (рис. 2). Здесь  $t$  – глубина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость

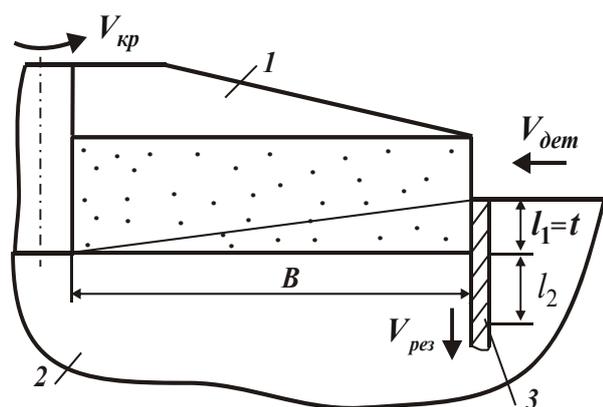


Рис. 2. Расчетная схема торцевого шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень

детали, м/с;  $B$  – длина рабочей части круга (длина контакта круга с деталью), м. В итоге установлена связь между температурой шлифования  $\theta$  и глубиной  $l_2$  проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали [4, 5]:

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

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

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время обработки, с;  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К;  $l_1 = t$  – толщина

слоя снятого материала, м;  $Q_{yd} = t \cdot V_{дет}$  – удельная производительность обработки, м<sup>2</sup>/с.

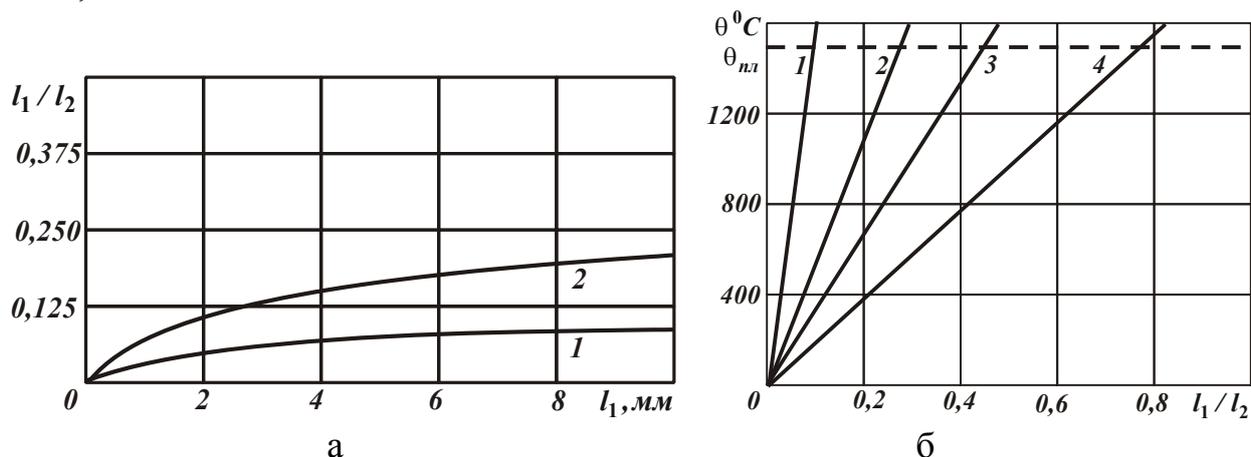


Рис. 3. Зависимости  $l_1/l_2$  от  $l_1$  (1 –  $V_{рез} = 2$  мм/мин; 2 –  $V_{рез} = 10$  мм/мин) (а) и  $\theta$  от  $l_1/l_2$  (1 –  $K_{ш} = 0,1$ ; 2 –  $K_{ш} = 0,3$ ; 3 –  $K_{ш} = 0,5$ ; 4 –  $K_{ш} = 1$ ).

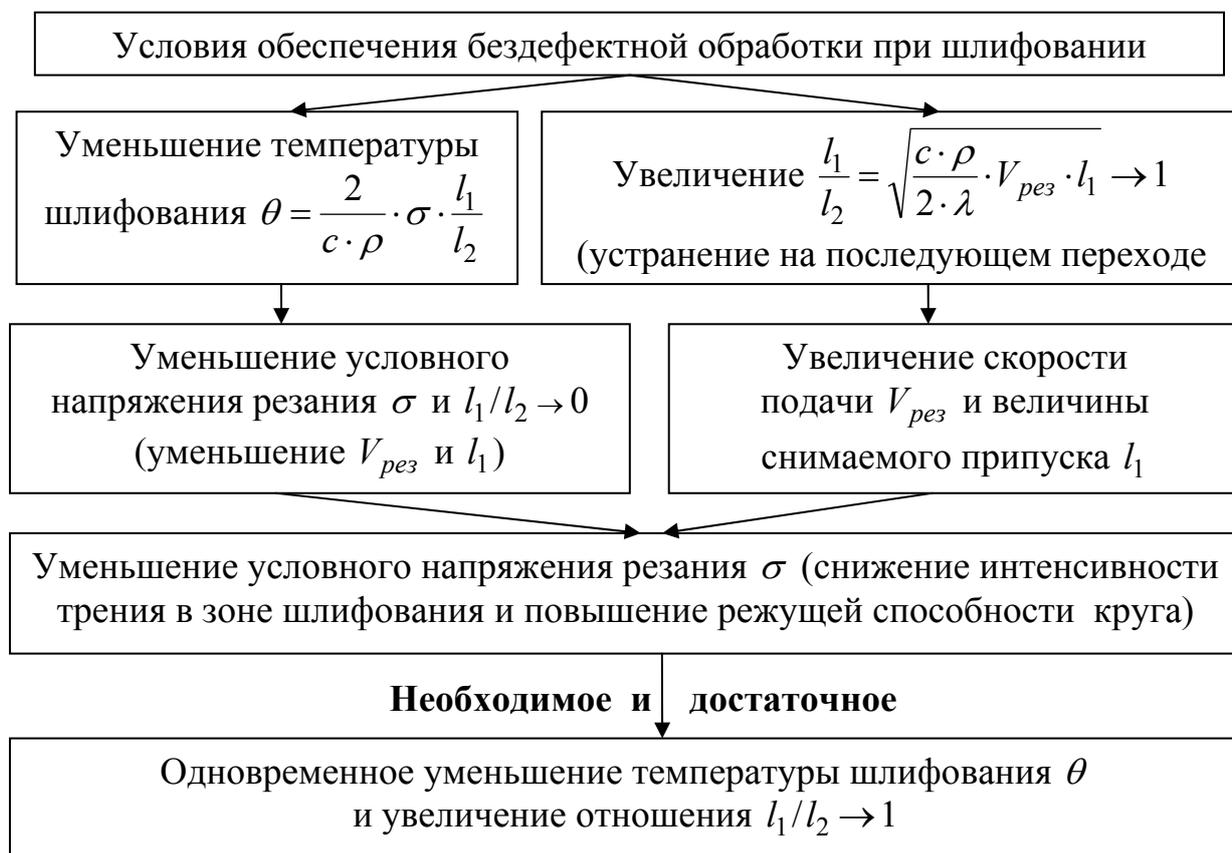


Рис. 4. Схема условий обеспечения бездефектной обработки при шлифовании.

Как вытекает из зависимости (1), уменьшение  $\theta$  предполагает увеличение глубины  $l_2$ . Следовательно, единственно возможным путем одновременного уменьшения параметров  $\theta$  и  $l_2$  и таким образом повышения качества обработки является уменьшение  $\sigma$  в результате снижения интенсивности трения в зоне шлифования и повышения режущей способности круга. Как вытекает из зави-

симости (1), уменьшение  $\theta$  предполагает увеличение глубины  $l_2$ . Следовательно, единственно возможным путем одновременного уменьшения параметров  $\theta$  и  $l_2$  и таким образом повышения качества обработки является уменьшение  $\sigma$  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/м<sup>3</sup>·град) отношение  $l_1/l_2 < 1$  (рис. 3,а). Установлено также, что обеспечение значений  $\theta$ , меньших температуры плавления стали ШХ15 ( $\theta_{пл} = 1500^\circ\text{C}$ ), возможно при  $l_1/l_2 \ll 1$  (рис. 3,б). Это связано с относительно большими значениями условного напряжения резания при шлифовании  $\sigma = \sigma_{сж} \cdot (1 + \sqrt{1 + K_{ш}^2}) / K_{ш}$ , 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/м<sup>2</sup> (для стали ШХ15  $\sigma_{сж} = 2 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>). Поэтому весьма сложно одновременно уменьшить температуру шлифования  $\theta$  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  $\theta$  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  $\theta$ , необходимо стремиться к уменьшению параметра  $l_2$  за счет уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$ . В обобщенном виде условия обеспечения бездефектной обработки при шлифовании показаны на рис. 4.

## 2. Расчет оптимальных условий обработки. Используя полученное теоретическое решение, произведена оптимизация параметров режимов зубошлифования с учетом температурного фактора. Как следует из зависимостей (1) и (2), уменьшить температуру шлифования $\theta$ при одной и той же производительности обработки можно уменьшением глубины шлифования $t$ , т.е. увеличивая количество проходов круга при съеме заданного припуска $P$ . Однако, это ведет к увеличению вспомогательного времени, связанного с реверсированием стола

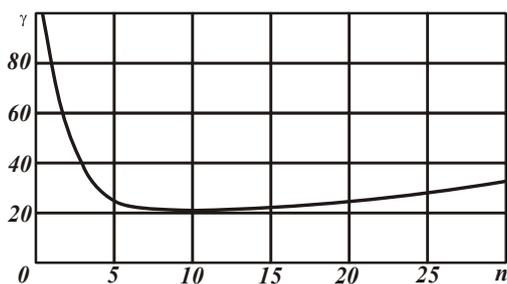


Рис. 5. Зависимость  $\gamma$  от  $n$  для  $n_{экстр} = 10$ .

станка. Поэтому существует оптимальное количество проходов круга  $n$ , при котором штучное время  $T_{шт}$  (равное сумме основного  $T_{осн}$  и вспомогательного  $T_{всп}$  времени обработки на операции зубошлифования) принимает минимальное значение. Зависимость для определения  $T_{шт}$  имеет вид

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

где  $T_{осн} = 2 \cdot z \cdot n \cdot k \cdot \tau_{осн}$ ;  $T_{всп} = 2 \cdot z \cdot n \cdot k \cdot \tau_{всп}$ ;  $z$  – количество зубьев;  $k$  – количество двойных возвратно-поступательных движений круга вдоль обрабатываемого зуба за один проход;  $\tau_{осн} = L / V_{дет}$  – основное время обработки за один двойной ход круга, с;  $L$  – длина продольного хода круга, м;  $\tau_{всп}$  – вспомогательное время обработки за один двойной ход круга, с;  $\gamma = \left( \frac{n_{экстр}^2}{n} + n \right)$  – без-

размерная величина. Подчиняя зависимость (4) необходимому условию экстремума  $T'_{штн} = 0$ , определены экстремальные значения  $n_{экстр}$ ,  $V_{дет}$  и минимальное значение  $T_{штн}$ :

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

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

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

Первое и второе слагаемые зависимости (7) равны между собой, т.е. равны основное  $\tau_{осн}$  и вспомогательное  $\tau_{всп}$  время обработки. Уменьшить  $T_{штнmin}$  можно прежде всего уменьшением параметров  $\sigma$  и  $\Pi$  при заданном значении  $\theta$ . При этом экстремальное значение  $V_{дет}$  тем больше, чем меньше вспомогательное время  $\tau_{всп}$ . Для исходных данных:  $\rho = 14,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $c = 40$  кал/(кг·град);  $\lambda = 14$  кал/(м·град);  $\sigma = 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\theta = 1000^\circ\text{C}$ ;  $\Pi = 0,4$  мм;  $L = 100$  мм;  $B = 30$  мм;  $\tau_{всп} = 1$ с, учитывая  $t = \Pi / n$ , получено:  $n_{экстр} = 9$ ;  $V_{дет} = 6$  м/мин;  $t = 0,045$  мм. Анализируя график (рис. 5), можно сделать вывод о том, что безразмерная величина  $\gamma$  не столь существенно изменяется в диапазоне  $n = 5 \dots 20$ . Это свидетельствует об эффективности съема припуска за небольшое количество проходов круга (в пределах 5 проходов).

### 3. Результаты экспериментальных исследований.

Экспериментально установлено, что при шлифовании стали 18ХГН2МФБ твердостью HRC 57...63 энергоёмкость обработки (условное напряжение резания)  $\sigma$  изменяется в пределах 13117...16964 МПа, а отношение  $l_1 / l_2$ , установленное расчетно-экспериментальным путем (рис. 6), равно  $l_1 / l_2 < 0,2$ . Поэтому на каждом последующем проходе круга нельзя устранить нарушенный на предыдущем проходе (в результате теплового воздействия) поверхностный слой детали. Повысить качество обработки в этих

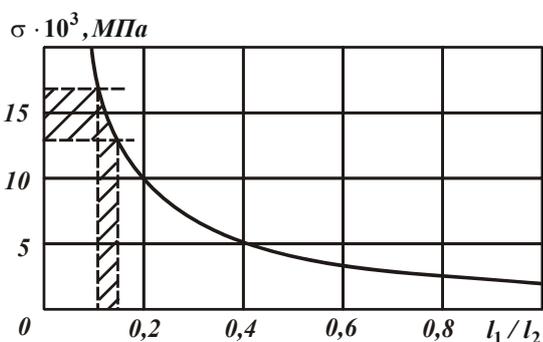


Рис. 6. Зависимость  $\sigma$  от  $l_1 / l_2$  для  $\theta = 800^\circ\text{C}$ .

условиях можно лишь за счет уменьшения температуры шлифования  $\theta$  путем уменьшения энергоемкости обработки, что достигается применением кругов с более высокой режущей способностью. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими решениями.

Используя экспериментальные значения энергоемкости обработки, про-

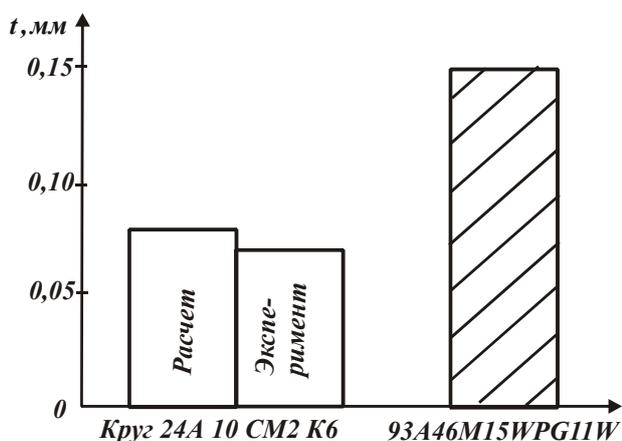


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные значения предельной глубины шлифования  $t$

изведены расчеты по зависимостям (5) и (6) оптимальных параметров режима шлифования зубчатого колеса из стали 18ХГН2МФБ твердостью  $HRC$  57...63 по критерию наименьшего штучного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования  $\theta$ . Теоретически установлено, что при зубошлифовании на станке мод. 5843ЕМ (работающем по методу обкатывания кругом конического профиля) абразивным кругом 2П 400х32х127 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/(м<sup>3</sup>·град);  $\lambda = 42$  Вт/(м·град);  $\sigma = 15 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\theta = 800^\circ\text{C}$ ;  $\Pi = 0,4$  мм;  $L = 100$  мм;  $\tau_{всн} = 0,5$  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. 7). Это указывает на незначительное расхождение расчетных и экспериментальных данных (в пределах 15%) и свидетельствует о достоверности теоретических решений.

Экспериментально установлено, что шлифование кругом T1ESP

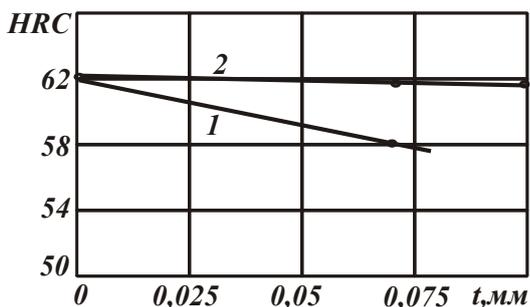


Рис. 8. Зависимость твердости  $HRC$  обработанной поверхности детали от глубины шлифования  $t$ :

- 1 – круг 24А 10 СМ2 8 К6;
- 2 – 93А46М15WPG11W.

400х32х127 93А46М15WPG11W, 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. Твердость обработанной поверхности в диапазоне  $t=0,01...0,1$  мм фактически не изменяется, тогда как при шлифовании кругом 2П 400х32х127 24А 10 СМ2 8 К6 – уменьшается, что естественно снижает износостойкость обработанной поверхности зубчатого колеса (рис. 8). Следовательно,

применение данного круга позволяет съем заданного припуска 0,4 мм осуще-

ствить за 4 прохода, гарантированно исключая образование прижогов и микро-трещин 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.

По данным компании "Винтертур", высокая пористость абразивного круга T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W обеспечивает его работу в режиме интенсивного самозатачивания, поддерживая таким образом в процессе шли-

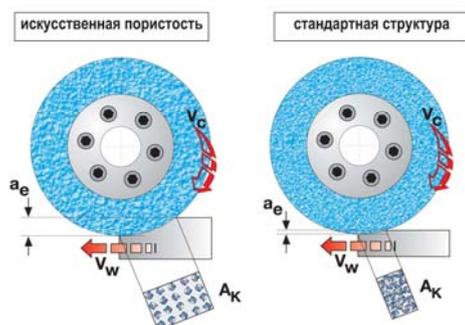


Рис. 9. Схемы шлифования кругами с искусственной пористостью и стандартной структурой.

фованья высокую режущую способность круга. Это достигается благодаря уменьшению количества абразивных зерен, расположенных на единице площади рабочей поверхности круга. В результате увеличивается сила резания, действующая на отдельное зерно, что обеспечивает его разрушение, т.е. приводит к самозатачиванию и повышению остроты режущих кромок зерна.

На рис. 9 показаны схемы шлифования кругами с искусственной пористостью и стандартной структурой. Как следует из рисунка, в первом случае абразивные зерна расположены реже на рабочей поверхности круга, что предопределяет его работу в режиме самозатачивания. На рис. 10 показаны поверхности режущих зерен из обычных и спеченных корундов. В первом случае поверхность зерна гладкая, а во втором случае – с острыми кромками, являющимися результатом расщепления зерна вследствие его самозатачивания. По сути, режущие зерна из обычных корундов являются затупленными, а режущие зерна из спеченных корундов – самозатачивающимися. Для того чтобы полностью использовать потенциальные возможности зерен из спеченных корундов компания "Винтертур" разработала соответствующую систему связки, которая способствует реализации свойств самозатачивания зерен. Применение зерен из электрокорунда высшего качества и спеченных корундов, благодаря работе круга в режиме самозатачивания, позволяет существенно повысить производительность обработки и стойкость круга, уменьшить температуру и силы резания, увеличить интервалы времени между правками круга.

Экспериментально установлено, что применение абразивного круга с двухсторонним коническим профилем типа 2П при зубошлифовании на указанных выше режимах резания обеспечивает требуемые значения параметра шероховатости обработки  $R_a < 0,6$  мкм. Для измерения параметров точности обработки зубчатых колес применена современная координатно-измерительная машина (КИМ) GLOBAL Perfomance 122210 производства итальянской фирмы DEA (концерн Hexagon) [6, 7]. Она позволяет существенно сократить время и

повысить точность и стабильность измерений, снижает потребность в дополнительной контрольной оснастке, обеспечивает возможность измерения тех размеров, которые ранее имеющимися техническими средствами не могли быть измерены. Разработаны "Правила пользования протоколами КИМ для зубчатых

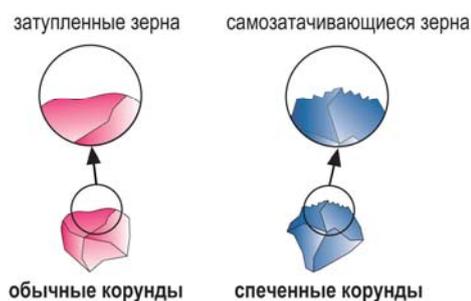


Рис. 10. Поверхности режущих зерен из обычных и спеченных корундов

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 соответственно снизить до 2-х раз трудоемкость обработки. Так, установлено, что при обработке зубчатого колеса ( $m=10$ ;  $z=41$ ;  $\beta=15^0$ ;  $B=105$  мм) съем припуска 0,4 мм может быть произведен за 3 черновых прохода, 1 чистовой проход и 1 проход при выхаживании. Обычно обработка производится за 5 черновых проходов, 2 чистовых и 1–2 прохода при выхаживании.

Полученные 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 высокопористого абразивного круга, обладающего высокой режущей способностью в условиях производительного глубинного шлифования. Съем припуска величиной 0,4 мм на сторону производится за 4 прохода круга со скоростью его перемещения вдоль обрабатываемого зуба, равной 3 м/мин, и скоростью вращения круга 40 м/с. По сравнению с традиционной схемой зубошлифования по методу обката это позволило до 5 раз увеличить производительность обработки. В результате годовая программа обработки зубчатых колес выполняется на одном зубошлифовальном станке мод. HOFLER RAPID 1250, что позволило высвободить 4 зубошлифовальных станка, работающих по схеме обката. Разработанные эффективные операции зубошлифования зубчатых колес внедрены в основное производство ПАО ХМЗ "Свет шахтера". 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.

**Выводы.** Теоретически доказано, что повысить качество обработки при шлифовании на основе одновременного уменьшения температуры шлифования и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали

можно за счет уменьшения условного напряжения резания путем снижения интенсивности трения в зоне резания и повышения режущей способности круга. Установлено, что при условии равенства основного и вспомогательного времени обработки имеет место экстремум (минимум) штучного времени в зависимости от количества проходов круга для заданной температуры шлифования. Определены оптимальные параметры обработки при многопроходном шлифовании, включая количество проходов круга, глубину шлифования и скорость перемещения детали.

**Список литературы:** 1. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с. 2. Справочник молодого шлифовщика / М.С. Наерман, Я.М. Наерман, А.Э. Исаков. – М.: Высш. шк., 1991. – 207 с. 3. Ящерицын П.И. Шлифование металлов / П.И. Ящерицын, Е.А. Жалнерович. – Минск: Беларусь, 1970. – 464 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. Новиков Ф.В. Оптимизация параметров режима шлифования зубчатых колес / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2010. – Вып.12. – С.56-62. 6. Нежебовский В.В. Повышение эффективности технологии изготовления зубчатых передач / В.В. Нежебовский // Труды 15-й Междунар. науч.-техн. конф. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”. – 2009. – С. 274-277. 7. Ковальчук А.Н. Эффективность применения координатно-измерительной машины GLOBAL PERFORMANCE 122210 для измерения деталей зубчатых передач / А.Н. Ковальчук, В.В. Нежебовский // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2010. – Вип. 101. – С. 214-225.