

С.В. Рябченко, н.с.

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля  
НАН Украины*

## ЗУБОШЛИФОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ ШЕСТЕРЕН ТАРЕЛЬЧАТЫМИ КРУГАМИ

*Рассматриваются вопросы повышения эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес 3–4 степени точности, основанной на использовании инструмента из сверхтвердых материалов. Исследована работоспособность тарельчатых шлифовальных кругов на различных связках и даны рекомендации по их применению при зубошлифовании.*

**Введение.** Зубошлифование является одним из методов финишной обработки закаленных зубчатых колес. Шлифование прецизионных и высокоточных зубчатых колес с внешними прямыми и косыми зубьями производится по методу обката на зубошлифовальных станках, работающих двумя абразивными кругами. Шлифовальные круги могут занимать различные положения относительно обрабатываемого колеса: параллельно между собой и под различными углами, как правило, 0, 15 или 20° (рис. 1). Зубошлифование двумя тарельчатыми кругами позволяет получать зубчатые колеса 4–5 степени точности с шероховатостью поверхности  $Ra = 1,0\text{--}0,3$  мкм [1].

Одним из путей повышения производительности и качества обработки зубчатых колес является применение для зубошлифования кругов из сверхтвердых материалов (СТМ) [2]. Сравнительные испытания показали увеличение производительности обработки при шлифовании кругами из СТМ в 1,5 раза по сравнению со шлифованием абразивными кругами, отсутствие «прижогов» на поверхности зуба и возможность получения зубчатых колес 4–5 степени точности. Режущая способность кругов из СТМ на 25–30 % больше, чем электрокорундовых кругов [3]. Меньший размерный износ кругов из СТМ позволяет отказаться от механизмов компенсации износа.

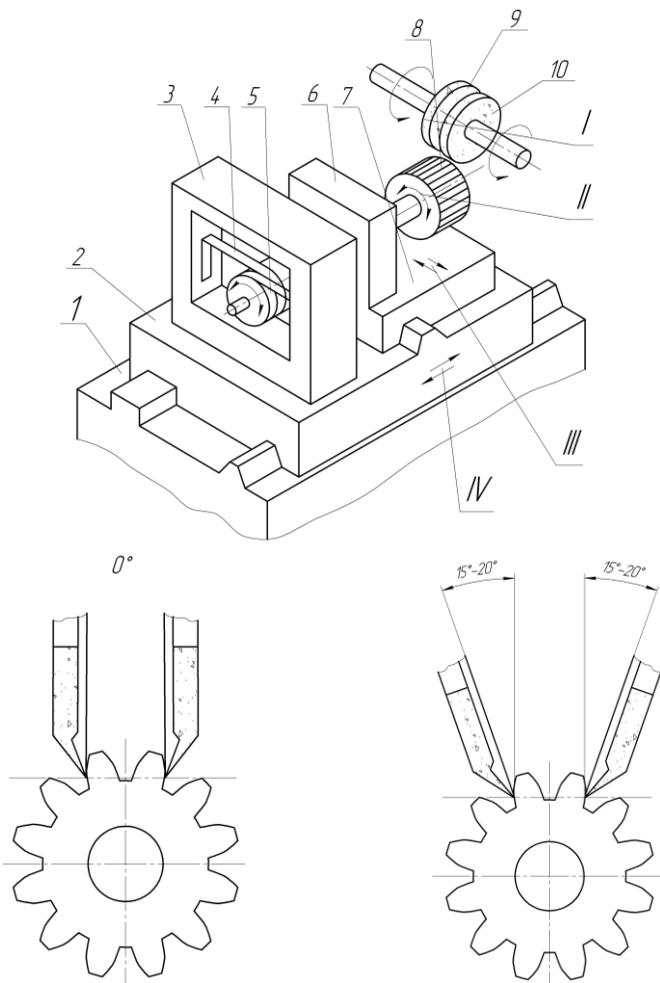


Рис. 1. Зубшлифование зубчатых колес  
непрерывной обкаткой двумя тарельчатыми кругами

Известно, что профиль сечения режущей части тарельчатого круга при шлифовании зубчатых колес отличается от прямоугольного [4]. Некоторые исследователи указывали на образование площадки износа на режущей кромке круга на органических связках. Однако до настоящего момента не установлена форма износа режущей кромки тарельчатых кругов из СТМ при шлифовании зубчатых колес.

**Целью** наших исследований было изучение работоспособности тарельчатых кругов и разработка на их основе технологии финишного шлифования высокоточных зубчатых колес и шестерен.

**Основная часть.** Исследование осуществляли на специальном стенде, созданном на базе зубошлифовального станка модели 5891 [5]. Станок был модернизирован для шлифования зубчатых колес с охлаждением и правкой кругов электроэрозионным методом. Зубошлифовальный станок настраивали на нулевой метод шлифования зубчатых колес. Скорость шлифовального круга –  $v_k = 27$  м/с, глубина шлифования –  $t = 0,01–0,1$  мм, время обката на одном зубе –  $\tau = 3–12$  с.

Исследование работоспособности тарельчатых кругов типа 12A2-20° 225x3x3x40 из кубического нитрида бора КР 125/100 на органической (B2-08), керамической (C10) и металлической (M2-09) связках производили при шлифовании зубчатых колес из стали ХВГ (59–61 HRC) модулем  $m = 6$  мм, числом зубьев  $z = 21$  зуб, шириной венца  $B = 20$  мм. Их работоспособность сравнивали с кругами из белого электрокорунда марки 24А 16 СМ2 6К5, наиболее используемыми в промышленности при шлифовании высокоточных зубчатых колес из железуглеродистых сплавов.

Работоспособность тарельчатых кругов оценивали следующими показателями: мощностью шлифования ( $N$ ), шероховатостью обработанной поверхности ( $Ra$ ), точностью эвольвентного профиля зуба ( $f_f$ ), величиной съема обрабатываемого материала и износом круга. Износ тарельчатого круга оценивали по изменению профиля слепка, оставленного на тонкой металлической пластине режущей частью вращающегося круга. Износ круга определяли по двум параметрам: износом по торцу –  $h$  и по диаметру –  $l$ .

Для исследования работоспособности тарельчатых шлифовальных кругов при зубошлифовании, первоначально устанавливалась площадь контакта круга с эвольвентным профилем зубчатого колеса. Экспериментально, определение площади контакта предусматривало введение инструмента в зацепление с колесом и измерение полученного следа. Во всех известных случаях, контурная площадь представлялась как сегмент с максимальной толщиной в центре, размеры которого значительно превосходят реальную площадь контакта. Это обусловлено тем, что не учитывалось наличие переходного участка (зоны резания) и обработанной ранее поверхности (рис. 2, 3).

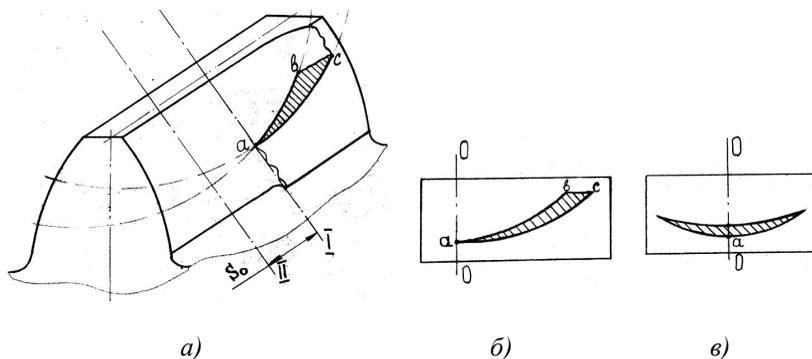


Рис. 2. Площадь контакту шліфувального круга і зубчатого колеса

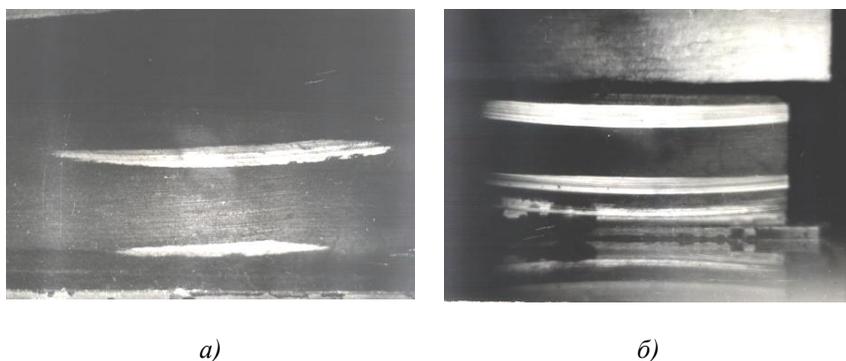


Рис. 3. Фотографії площадок контакту:  
 а – шліфування на станке МААГ; б – шліфування на станке 5891

Для того чтобы учесть эти особенности процесса формообразования, зубчатое колесо предварительно обрабатывалась на часть ширины его зубчатого венца, соответствующей исследуемой фазе зацепления инструмента с колесом, затем инструмент выводился из зацепления и смещался в направлении рабочей подачи на величину пути обката. Шлифовальный круг оставлял след на обрабатываемом зубчатом колесе и в дальнейшем происходил замер величины контурной площади.

Сравнение исследований работоспособности шлифовальных кругов из электрокорунда и кубического нитрида бора (КНБ) с охлаждением и без него от глубины резания и времени обката показало, что охлаждение снижает мощность шлифования при

использовании кругов из КНБ в 1,5–2 раза. При использовании кругов из электрокорунда охлаждение уменьшает мощность шлифования на 20–50 %. На всех исследуемых режимах обработки мощность шлифования при использовании кругов из КНБ меньше, чем при использовании кругов из электрокорунда на 20–30 %. Причем эта разница имеет тенденцию к увеличению при использовании охлаждения и повышении глубины резания. Процесс шлифования кругами из электрокорунда сопровождался интенсивным износом круга и потерей их режущей способности, что вызывало необходимость правки круга через каждые 3–5 зубьев. Правку кругов из КНБ осуществляли после полного оборота колеса. Изменения шероховатости поверхности зубчатых колес показывают, что более высокая шероховатость поверхности при шлифовании зубчатых колес кругами из КНБ объясняется большими размерами зерен кубического нитрида бора. На всех исследуемых режимах обработки характерно увеличение шероховатости поверхности при уменьшении времени обката зубчатого колеса. Причем при работе без охлаждения шероховатость поверхности увеличивалась больше, чем при работе с охлаждением. Глубина резания на всех исследуемых диапазонах не оказывала существенного влияния на шероховатость поверхности, хотя тенденция к возрастанию шероховатости поверхности наблюдалась, причем для кругов из электрокорунда это было более характерно.

Исследования работоспособности тарельчатых кругов из КНБ при зубошлифовании на керамических, металлических и органических связках производили при интенсивном охлаждении зоны шлифования. Предварительные испытания показали, что при работе без охлаждения на поверхности зубчатого колеса образуются “прижоги”, а шлифовальные круги быстро теряют режущую способность. Анализ результатов показал, что мощность шлифования кругами из КНБ на керамической связке на 30–40 % выше по сравнению со шлифованием кругами из КНБ на органических связках. При прямом и обратном ходе каретки станка мощность шлифования практически не зависит от времени обката зубчатого колеса, хотя небольшой рост мощности заметен при уменьшении времени обката. Шлифование зубчатых колес кругами из КНБ на керамической связке обеспечивало высокую точность

( $f_{jr} = 4\text{--}5$  мкм) эвольвентного профиля зуба по сравнению с исходным профилем ( $f_{jr} = 8\text{--}14$  мкм).

Исследование работоспособности тарельчатых кругов из КНБ на металлической связке (12A2-20° 225x3x3x40 КР 125/100 М2-09)

производили с использованием правки круга электроэрозионным методом. Установлено, что мощность шлифования кругами из КНБ на металлической связке при прямом и обратном ходе каретки станка на 15–20 % выше по сравнению со шлифованием кругами из КНБ на органических связках. Шероховатость поверхности зубчатого колеса при всех исследуемых режимах соответствовала  $Ra = 0,7\text{--}0,75$  мкм, при этом ее большее значение определялось меньшим значением времени обката ( $t = 3$  с). Глубина резания на шероховатость не оказывала существенного влияния.

Шлифование зубчатых колес кругами из КНБ на металлической связке обеспечивает высокую точность эвольвентного профиля зуба ( $f = 5\text{--}6$  мкм) по сравнению с исходным профилем ( $f = 11\text{--}12$  мкм). Для получения высокой точности эвольвентного профиля необходимо проведение 2–3 чистовых проходов с последующим выхаживанием. Шлифование зубчатых колес кругами из КНБ на металлических связках обеспечивает разность соседних шагов зубчатого колеса равным 2–4 мкм, что является показателем высокой точности обработки.

Зависимость погрешности эвольвенты и мощности шлифования от числа обработанных зубьев за 16 проходов представлены на рисунках 4 и 5 соответственно.

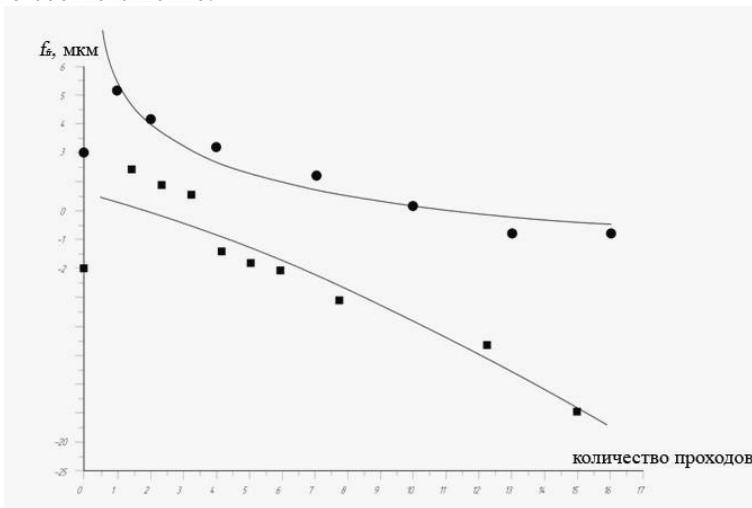


Рис. 4. Зависимость погрешности профиля  $f_{fr}$  от количества проходов (а — при  $t = 0,05$  мм; б — при  $t = 0,02$  мм)

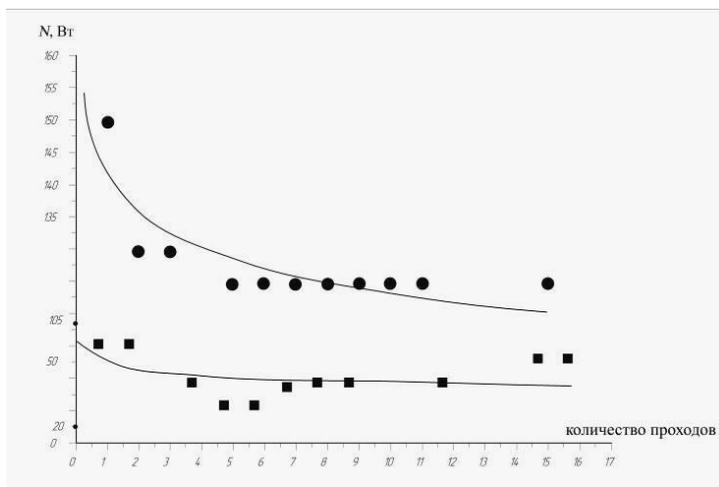


Рис. 5. Зависимость мощности шлифования  $N$  от количества проходов ( $a$  – при  $t = 0,05$  мм;  $b$  – при  $t = 0,02$  мм)

Исследование износа тарельчатых кругов и его влияние на точность эвольвентного профиля зубчатого колеса производилось при черновом (с глубиной  $t = 0,05$  мм) и чистовом (с глубиной  $t = 0,02$  мм) зубошлифовании.

Установлено, что после ускоренного износа круга в течение первого прохода величина интенсивности износа в дальнейшем стабилизируется (рис. 6, 7). Шлифовальный круг работает равномерно без наступления критического износа. Это характерно как для черного, так и чистового зубошлифования. В то же время характер изменения погрешности профиля и мощности шлифования говорит о том, что правка круга на чистовых режимах не требуется.

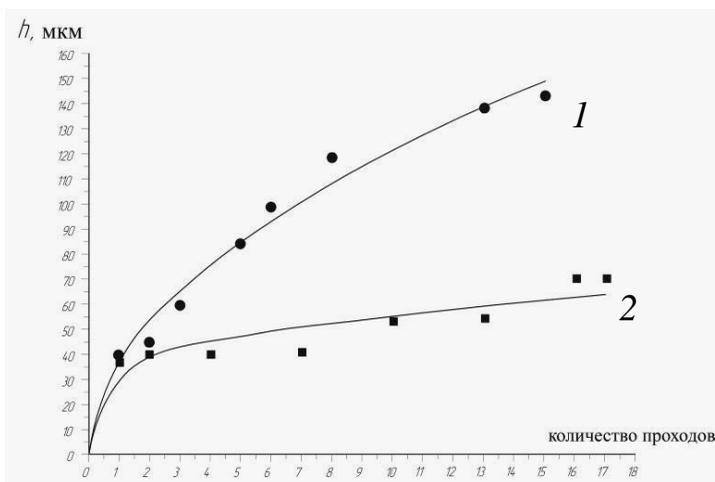


Рис. 6. Залежність износу круга по торцю  $h$  від кількості проходів (1 – при  $t = 0,05$  мм; 2 – при  $t = 0,02$  мм)

**Вывод.** Аналіз проведених експериментів показав, що лімітуючим параметром точності обробки зубчатого колеса є розмірний износ тарельчатого круга, який практично пропорційний кількості оброблених зубців без правки. Величина износу визначає точність оброблюваного зубчатого колеса. Зміна износу показує, що після прискореного періоду прироботки круга впродовж першого проходу величина його в подальшому стабілізується. Впродовж всієї обробки потужність різання практично залишається на одному рівні. Не змінюється і фактичний з'єм матеріалу, перебуваючи в межах 0,61–0,50. Це свідчить про те, що в процесі шліфування зубчатих колес тарельчатий круг з КНБ працює в режимі самозаточивання. Змінюються тільки геометричні параметри шліфувального круга за рахунок його износу.

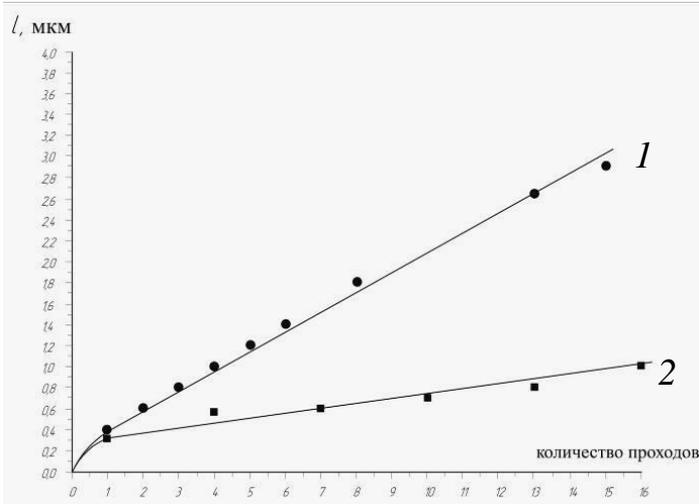


Рис. 7. Зависимость износа круга по диаметру  $l$  от количества проходов (1 – при  $t = 0,05$  мм; 2 – при  $t = 0,02$  мм)

Проведенные предварительные исследования процесса зубошлифования на станке мод. 5891 показали высокую эффективность обработки зубчатых колес и шестерен тарельчатыми кругами из сверхтвердых материалов. Эти исследования позволили уточнить конструкции основных узлов базового станка и предложить новую конструкцию специального зубошлифовального станка, работающего тарельчатыми кругами из СТМ и имеющего специальный механизм электроэрозионной правки. Такой станок (рис. 8) был спроектирован и изготовлен на базе серийного зубошлифовального станка мод. 5А851 предназначенного для работы двумя тарельчатыми кругами.



Рис. 8. Общий вид специального зубошлифовального станка

Основным отличием специального станка от базовой модели является наличие системы охлаждения и специального устройства правки кругов из СТМ.

В случае шлифования зубчатых колес кругами из СТМ на керамических связках было проведено изменение механизма правки алмазными карандашами, направленное на повышение жесткости механизма правки. Для правки кругов из СТМ на металлических связках было разработано специальное устройство правки, работающее в автоматическом цикле.

Для осуществления технологии шлифования зубчатых колес нами были разработаны тарельчатые шлифовальные круги на металлических связках формы 12V9, техническая документация и оснастка для их изготовления.

#### Список использованной литературы:

1. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес / Э.Н. Гулида. – Львов : Вища школа, 1977. – 168 с.
2. Высокопроизводительное зубошлифование кругами из кубического нитрида бора / Л.Л. Мишинаевский, А.А. Сагарда, В.М. Емельянов и др. // Синт. алмазы. – 1970. – № 5. – С. 40–42.

3. Эльбор в машиностроении / под. ред. *В.С. Лысанова*. – Л. : Машиностроение, 1978. – 280 с.
4. *Мишинаевский Л.Л.* Износ шлифовальных кругов / *Л.Л. Мишинаевский*. – К. : Наук. думка, 1982. – 192 с.
5. *Рябченко С.В.* Разработка технологии шлифования зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ / *С.В. Рябченко* // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин : зб. наук. пр. (Серія Г «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти»). – К. : ІНМ НАН України, 2006. – С. 161–168.

РЯБЧЕНКО Сергей Васильевич – научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- зубошлифование;
- алмазно-абразивные инструменты.

Статья поступила в редакцию 22.03.2012

**Рябченко С.В.** Зубошлифование высокоточных шестерен тарельчатыми кругами

**Рябченко С.В.** Зубошлифування високоточних шестерен тарельчатими кругами

**Rjabchenko S.V.** Precision gear-grinding mop disc

УДК 621.923

**Зубошлифування високоточних шестерен тарілоччастими кругами / С.В. Рябченко**

Розглядаються питання підвищення ефективності шлифування високоточних зубчастих коліс 3–4 ступеня точності, заснованої на використанні інструмента з надтвердих матеріалів. Досліджена працездатність тарілоччастих шлифувальних кругів на різних зв'язках і дані рекомендації з їхнього застосування при зубошлифуванні.

УДК 621.923

**Precision gear-grinding mop disc / S.V. Rjabchenko**

The problems of increasing the efficiency of grinding highly precision gearwheels of the 3–4 degree of precision using superhard material tools are discussed. The efficiency of dish grinding wheels in various bonds has been studied. Recommendations how to use wheels in gear grinding are given.