

С.В. Рябченко, к.т.н., с.н.с.
Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины
Л.Г. Полонский, д.т.н., проф.
В.Д. Головня, к.пед.н.
В.А. Яновский, доц.
Я.А. Козяр, студ.
Житомирский государственный технологический университет

Шлифование зубчатых колес кругами из кубического нитрида бора

Проведённый в статье анализ результатов сравнения различных методов зубошлифования показал, что метод шлифования двумя тарельчатыми кругами, наиболее низко производителен так как предназначен для шлифования высокоточных (3–4 степень) зубчатых колес. Определено, что главной проблемой шлифования зубчатых колес является повышение производительности обработки при сохранении качественных параметров и точности их зубьев. Установлена связь между обеспечением качества и производительности обработки высокоточных (3–4 степень) зубчатых колес и новыми технологиями, инструментом для шлифования. Целью исследования есть повышение эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес с использованием абразивных кругов из кубического нитрида бора (КНБ). Для достижения цели была исследована работоспособность тарельчатых шлифовальных кругов из КНБ на различных связках и даны рекомендации по их применению при зубошлифовании высокоточных зубчатых колес. В результате проведенного исследования был сделан вывод о том, что на всех исследуемых режимах обработки мощность шлифования при использовании кругов из КНБ ниже в 1,5–2 раза, чем при использовании кругов из электрокорунда. Шлифование кругами из КНБ обеспечивает необходимую точность обработки зубчатых колес (3–4 степени) и шероховатость поверхности.

Ключевые слова: шлифование; зубчатые колеса; тарельчатые круги; кубический нитрид бора.

Проблемы зубошлифования. В машиностроении одним из путей реализации задач повышения производительности обработки, является широкое применение новых абразивных и алмазных инструментов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Алмазно-абразивная обработка позволяет обеспечить требуемые точность и качество деталей при высокой производительности, а значит, обеспечить высокую надежность и долговечность машиностроительной продукции в процессе эксплуатации [1, 4, 8]. Все это в полной мере относится к процессам обработки зубчатых колес. Обеспечение качества и производительности обработки высокоточных (3–4 степень) зубчатых колес связано с разработкой новых технологий и инструментов для шлифования. Главной проблемой шлифования зубчатых колес является повышение производительности обработки при сохранении качественных параметров и точности их зубьев.

Анализ предыдущих исследований зубошлифования. Зубошлифование является одним из основных способов финишной обработки закаленных зубчатых колес [6]. Шлифованием обеспечивается 3–6 степень точности зубчатых колес и шероховатость поверхности Ra 0,20–1,2 [3].

Шлифуют зубчатые колеса методами обката с непрерывным или периодическим делением и методом копирования с периодическим делением [9]. Метод копирования основан на воспроизведении рабочей поверхностью шлифовального круга впадины зубьев шлифуемого колеса. Метод обката предусматривает зацепление обрабатываемого колеса с зубом рейки, воспроизводимой поверхностями шлифовального круга. Наиболее производителен метод непрерывного шлифования абразивным червяком. При шлифовании зубьев методом обката с периодическим делением применяют различные типы абразивных кругов: один конусный круг, один плоский круг, два тарельчатых круга. Шлифовальные круги могут занимать различные положения относительно обрабатываемого колеса, а именно: параллельно между собой на расстоянии, равном длине общей нормали обрабатываемого колеса (0-градусный метод шлифования) или под различными углами (как правило, 15 или 20°) [9].

При шлифовании методом обката с периодическим делением двумя тарельчатыми кругами (на станках типа «МААГ» [10]) обеспечивается точность колес, начиная с 3 степени. Методы непрерывного шлифования червячным кругом (на станках типа «Reishauer») и обката с периодическим делением коническим шлифовальным кругом (на станках типа «Niles») уступают по точности шлифованию зубчатых колес двумя тарельчатыми кругами.

Анализируя результаты сравнения различных методов зубошлифования, следует отметить, что метод шлифования двумя тарельчатыми кругами, наиболее низко производителен. Такой метод предназначен для шлифования высокоточных колес (3–4 степень точности), что не обеспечивается другими методами. Исключением является метод копирования, однако обеспечение высокой точности сопряжено с большими затратами по подготовке шлифовального инструмента.

Перспективный путь дальнейшего развития методов шлифования высокоточных зубчатых колес в значительной степени связан с применением инструмента из кубического нитрида бора (КНБ). Шлифование кругами из КНБ по сравнению с обработкой обычными абразивами имеет определенные особенности [5]: шлифовальные круги из КНБ существенно более высокой износостойкости; их использование обеспечивает повышение качества поверхностного слоя обработанных изделий; создается возможность шлифования без правки кругов или при минимальном использовании.

Цель исследований. Повышение эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес с использованием абразивных кругов из кубического нитрида бора (КНБ).

В настоящем исследовании зубчатые колеса шлифовали на специальном стенде, созданном на базе зубошлифовального станка модели 5891, работающего с одним тарельчатым кругом. Станок модернизировали для шлифования зубчатых колес с охлаждением и правкой кругов электроэрозионным методом [7]. При этом применялись тарельчатые круги формы 12А2-20° из КНБ зернистостью 125/100. Шлифовали зубчатые колеса из стали ХВГ (62 HRC) с модулем $m = 6$ мм, количеством зубьев $z = 21$, шириной венца $B = 20$ мм.

Работоспособность тарельчатых кругов из КНБ при шлифовании зубчатых колес оценивали по следующим показателям: мощности шлифования (N), шероховатости обработанной поверхности (R_a), точности эвольвентного профиля зуба (f_r), величине съема обрабатываемого материала и износу круга. Износ тарельчатого круга оценивали по изменению профиля слепка, оставленного на тонкой металлической пластине режущей частью вращающегося круга. Износ круга определяли по двум параметрам: износу по торцу h и диаметру l .

Предварительно испытывали на работоспособность кругов из КНБ на органической связке (круги 12А2 225×3×1,5×40 КРС 125/100 100 % В2-08), белого электрокорунда (круги тип 12 225×3×40 24А 16 СМ2 6К5) и хромистого электрокорунда (круги тип 12 225×3×40 А89 16 СМ2 6К5). В качестве охлаждающей жидкости использовали масло «Индустриальное 12».

Анализ результатов шлифования показал, что эффективная мощность шлифования зубчатых колес при обработке кругами из КНБ в 2 раза ниже, чем кругами из белого электрокорунда и в 1,5 раза ниже, чем кругами из хромистого электрокорунда. 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.

После обработки результатов исследования эффективной мощности пришли к выводу, что мощность зубошлифования зависит от глубины резания и продолжительности обката. Графики зависимости мощности шлифования зубчатого колеса кругами из белого электрокорунда и КНБ с охлаждением показаны на рис. 1, а, без охлаждения – на рис. 1, б.

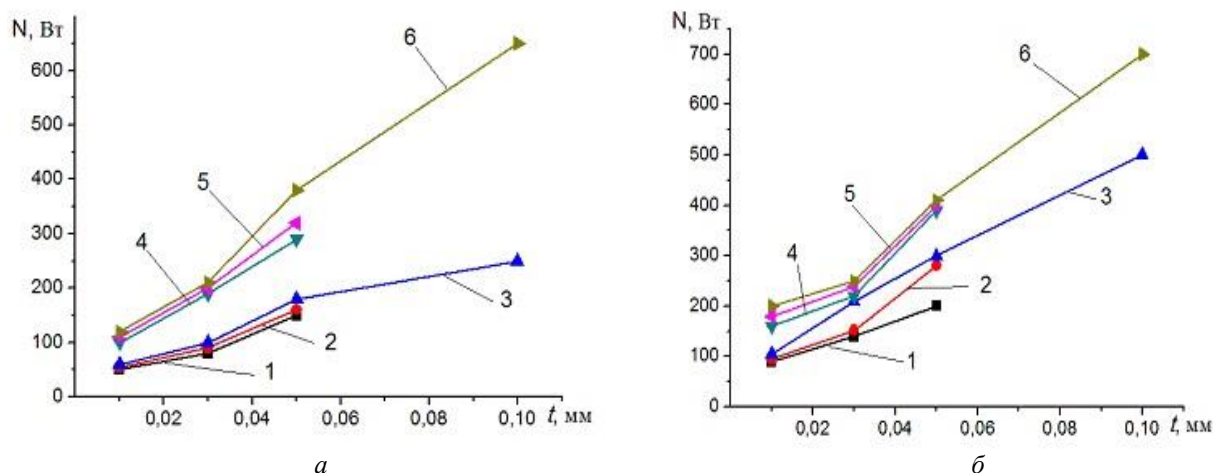


Рис. 1. Графики мощности зубошлифования: а – с охлаждением; б – без охлаждения
(1, 4 при $\tau = 3$ с; 2, 5 при $\tau = 5$ с; 3, 6 при $\tau = 8$ с);
1, 2, 3 – круги из КНБ; 4, 5, 6 – круги из электрокорунда

Анализ результатов показал, что в случае интенсивного охлаждения мощность шлифования при использовании шлифовальных кругов из КНБ снижается в 1,5–2 раза. В случае использования кругов из электрокорунда при охлаждении мощность шлифования снижается на 20–50 %. На всех исследуемых режимах обработки мощность шлифования при использовании кругов из КНБ ниже в 1,5–2 раза, чем при использовании кругов из электрокорунда. Причем эта разница имеет тенденцию к увеличению с использованием охлаждения и увеличением глубины резания.

Параллельно с исследованием кругов на работоспособность по критерию мощности шлифования оценивали шероховатость (R_a) эвольвентной поверхности зубчатых колес. Графики изменения шероховатости поверхности зубчатых колес после обработки без охлаждения показаны на рис. 2, а, с охлаждением – на рис. 2, б.

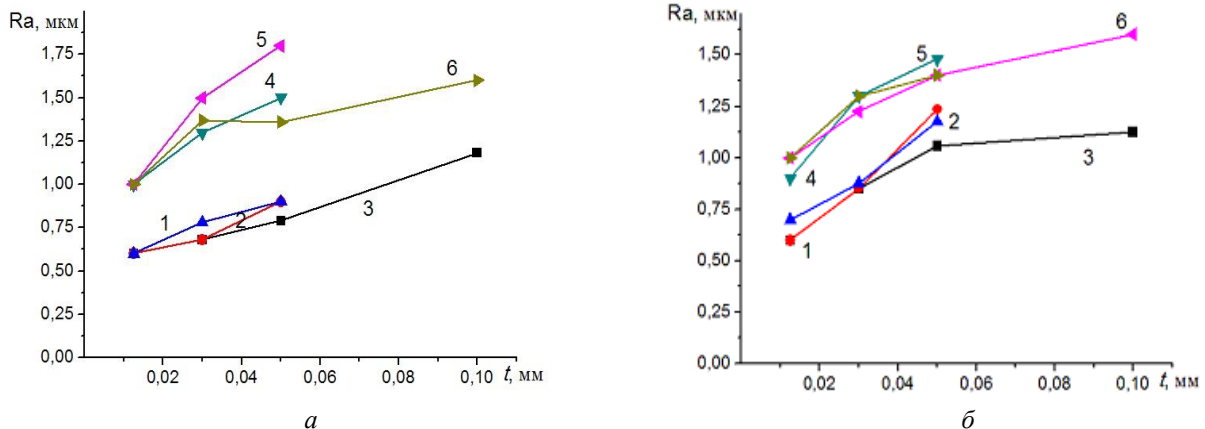


Рис. 2. Графики шероховатости поверхности зуба после обработки: а – с охлаждением; б – без охлаждения (1, 4 при $\tau = 3$ с; 2, 5 при $\tau = 5$ с; 3, 6 при $\tau = 8$ с); 1, 2, 3 – круг из КНБ; 4, 5, 6 – круг из электрокорунда

Результаты исследования шероховатости, показали повышение шероховатости эвольвентной поверхности зубьев $R_a 1,0$ при шлифовании кругами из КНБ. Это обусловлено содержанием агрегированных зерен КНБ с покрытием стеклом размером до 0,5–1 мм. На всех исследуемых режимах обработки фиксировали повышение шероховатости поверхности при уменьшении продолжительности обката зубчатого колеса, причем при обработке без охлаждения эта тенденция более выражена. Заметна также более высокая разница шероховатости при обработке с охлаждением между электрокорундом и КНБ. Так, при обработке без охлаждения разница составляет в среднем 20 %, с охлаждением – до 45 %. Глубина резания на всех исследуемых диапазонах не существенно влияла на шероховатость поверхности, хотя тенденция к повышению шероховатости наблюдалась.

Результаты испытания кругов из КНБ с металлопокрытием зерен (круги 12A2 225×3×3×40 КРМ 125/100 100 % В2-08) показали, что шероховатость зуба при их применении снижалась в 2 раза по сравнению с кругами из КНБ с покрытием стеклом и составляла $R_a 0,65$. Мощность шлифования повышалась на 10–20 %, износ кругов достиг уровня с применением кругов из КНБ с покрытием стеклом.

График изменения погрешности профиля f_f в зависимости от количества обработанных зубьев показан на рисунке 3. Увеличение погрешности профиля до $f_f = 14 \pm 0,1$ мкм после шлифования первых двух-трех зубьев обусловлено деформацией технологической системы от усилий резания. При дальнейшем шлифовании зубчатого колеса на первом проходе погрешность профиля составила $f_f = 10,0 \pm 0,5$ мкм.

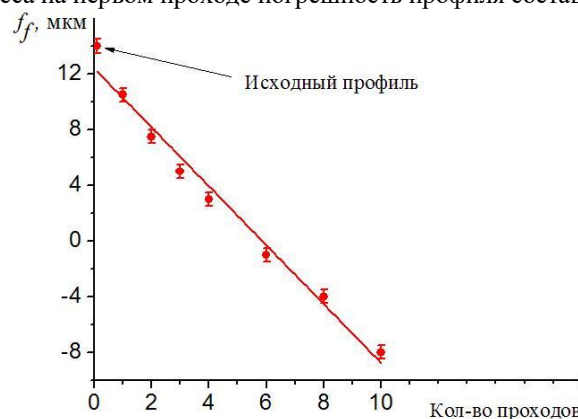


Рис. 3. График зависимости изменения погрешности профиля f_f от количества проходов

Плавное снижение погрешности на последующих проходах обусловлено компенсацией этих деформаций вследствие износа круга, что подтверждается резким отрицательным отклонением профиля, полученным в результате выхаживающих проходов после десяти циклов с глубиной резания $t = 0,05$ мм.

Характер изменения мощности по проходам свидетельствует о снижении мощности на первом проходе с $150 \pm 1,0$ до $130 \pm 1,0$ Вт и затем до $120 \pm 1,0$ Вт, а также стабилизации мощности шлифования после четырех проходов на уровне $105 \pm 1,0$ Вт.

Анализ графиков погрешности профиля зуба и мощности резания показал, что при обработке зубчатого колеса режущая способность круга не снижается. Наблюдается размерный износ круга, о чем свидетельствует изменение значений $l = 2,2$ мм и $h = 0,13$ мм, а также изменение фактического съема после каждого прохода (коэффициент съема припуска увеличился с 0,5 до 0,7).

Установлено, что при черновом шлифовании после первого прохода на режущей кромке круга формируется площадка износа $h = 30\text{--}50$ мкм, что соответствует приработочному износу. Аналогичный результат получен при финишном шлифовании зубчатых колес, однако площадка износа, гораздо меньшая – до $h = 30$ мкм.

Выводы. Исследованиями шлифования зубчатых колес кругами из КНБ установлено, что после наступления приработки шлифовального круга мощность резания в дальнейшем не изменяется. Не изменяется и фактический съем шлифуемого металла после приработки круга. Все это говорит о стабилизации процесса шлифования и работе круга в режиме самозатачивания. Установлено, что для уменьшения периода приработки шлифовального круга из КНБ на режущей кромке необходимо предварительно формировать фаску размером h до 30 мкм. Установлено, что на всех исследуемых режимах обработки мощность шлифования при использовании кругов из КНБ ниже в 1,5–2 раза, чем при использовании кругов из электрокорунда. Шлифование кругами из КНБ обеспечивает необходимую точность обработки зубчатых колес (3–4 степени) и шероховатость поверхности $Ra 0,65$.

Список использованной литературы:

1. Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Соколова И.Д., Свитка А.С. Анализ методов шлифования зубчатых колес на современном оборудовании / И.Д. Соколова, А.С. Свитка // Инновационная наука. – 2016. – № 9 (21). – С. 83–87.
3. Бенкин В.А. Прогрессивные методы финишной обработки цилиндрических зубчатых колес: обзор / В.А. Бенкин. – М. : Изд-во НИИМаш, 1989. – 40 с.
4. Сверхтвердые сверхпроводящие материалы на основе алмаза и кубического нитрида бора / Г.А. Дубицкий, В.Д. Бланк, С.Г. Буга, Е.Е. Семенов, В.А. Кульбачинский, А.В. Кречетов, В.Г. Кытин // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Т. 81, Вып. 5–6. – С. 323–326.
5. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов / Л.Л. Мишнаевский. – К. : Наук. думка, 1982. – 192 с.
6. Полканов Е.Г. Применение высокопористых кругов для шлифования зубчатых колес / Е.Г. Полканов, С.А. Рябцев // Современные тенденции технических наук : мат-лы III Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2014 г.). – Казань : Бук, 2014. – С. 56–58.
7. Исследование качества обрабатываемой поверхности зубчатых колес после шлифования кругами из КНБ / С.В. Рябченко, Я.Л. Сильченко, В.Т. Федоренко, Л.Г. Полонский, В.А. Яновский // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – Вип. 15. – С. 167–177.
8. Рябченко С.В. Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ / С.В. Рябченко // Сверхтвердые материалы. – 2014. – № 6. – С. 81–89.
9. Сильвестров Б.Н. Зубошлифовальные работы / Б.Н. Сильвестров. – М. : Высш. шк., 1985. – 272 с.
10. Повышение качества поверхности при шлифовании зубчатых колес на станках MAAG / А.А. Якимов, А.Ю. Перевезенцева, А.Ф. Ангел, П.В. Бреус // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия : Металлообработка. – 2014. – № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.informdom.com/metalloobrabotka/2014/4/povyshenie-kachestva-poverhnosti-pri-shlifovanii-zubchatyh-koles-na-stankah-maag.html>.

References:

1. Reznikov, A.N. (ed.) (1977), *Abrazivnaja ialmaznaja obrabotka materialov*, spravochnik, Mashinostroenie, Moskva, 391 p.
2. Sokolova, I.D. and Svitka, A.S. (2016), «Analiz metodov shlifovanija zubchatyh koles na sovremennom oborudovanii», *Innovacionnaja nauka*, No. 9 (21), pp. 83–87.
3. Benkin, V.A. (1989), *Progressivnye metody finisnoj obrabotki cilindricheskikh zubchatyh koles: obzor*, Izd-vo NIIMash, Moskva, 40 p.
4. Dubickij, G.A., Blank, V.D., Buga, S.G., Semenov, E.E., Kul'bachinskij, V.A., Krechetov, A.V. and Kytin, V.G. (2005), «Sverhtverdye sverhprovodjashhie materialy na osnove almaza i kubicheskogo nitrida bora», *Pis'ma v ZhETF*, Vol. 81, No. 5–6, pp. 323–326.
5. Mishnaevskij, L.L. (1982), *Iznos shlifoval'nyh krugov*, Nauk. dumka, Kiev, 192 p.

6. Polkanov, E.G. and Rjabcev, S.A. (2014), «Primenenie vysokoporistyh krugov dlja shlifovaniya zubchatyh koles», *Sovremennye tendencii tehniceskikh nauk, materialy III Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*, ot oktjabrja, Buk, Kazan', pp. 56–58.
7. Rjabchenko, S.V., Sil'chenko, Ja.L., Fedorenko, V.T., Polonskij, L.G. and Janovskij, V.A. (2015), «Issledovanie kachestva obrabatyvaemoj poverhnosti zubchatyh koles posle shlifovaniya krugami iz KNB», *Procesi mehanichnoi obrobki v mashinobuduvanni*, zb. nauk. prac', Vol. 15, ZhDTU, Zhitomir, pp. 167–177.
8. Rjabchenko, S.V. (2014), «Shlifovanie zubchatyh koles tarel'chatymi krugami iz STM», *Sverhtverdye materialy*, No. 6, pp. 81–89.
9. Sil'vestrov, B.N. (1985), *Zubshlifoval'nye raboty*, Vysshaja shkola, Moskva, 272 p.
10. Jakimov, A.A., Perevezenceva, A.Ju., Angel, A.F. and Breus, P.V. (2014), «Povyshenie kachestva poverhnosti pri shlifovanii zubchatyh koles na stankah MAAG», *Oborudovanie i instrument dlja professionalov*, Serija *Metalloobrabotka*, No. 4, available at: <http://www.informdom.com/metalloobrabotka/2014/4/povyshenie-kachestva-poverhnosti-pri-shlifovanii-zubchatyh-koles-na-stankah-maag.html>

Рябченко Сергей Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

- шлифование зубчатых колес;
- алмазно-абразивная обработка.

E-mail: s.riabchenko@ukr.net.

Полонский Леонид Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики и компьютерно-интегрированных технологий Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

- механическая обработка конструкционных материалов.

E-mail: pol@ztu.edu.ua.

Головня Вячеслав Дмитриевич – кандидат педагогических наук, доцент кафедры прикладной механики и компьютерно-интегрированных технологий Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

- компьютерное конструирование и моделирование;
- системы автоматизированного проектирования;
- механическая обработка конструкционных материалов.

E-mail: slvgol@gmail.com.

Яновский Валерий Анатольевич – доцент кафедры прикладной механики и компьютерно-интегрированных технологий Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

- механическая обработка конструкционных материалов.

Козяр Ярослав Анатольевич – студент факультета инженерной механики Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

- механическая обработка конструкционных материалов.

Статья поступила в редакцию 01.10.2017.