

УДК 621.923

DOI: 10.30987/article_5be14a35530b65.64215370

С.В. Рябченко

ШЛИФОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС КРУГАМИ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Рассмотрены вопросы повышения эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес (3–4 степени точности) путем использования инструмента из кубического нитрида бора (КНБ). Исследована работоспособность тарельчатых шлифовальных кругов из КНБ на различных связках и

даны рекомендации по их применению при зубошлифовании.

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

S.V. Ryabchenko

COG-WHEEL GRINDING WITH ABRASIVE CUBIC BORON NITRIDE DISKS

The research objective was cog-wheel grinding effectiveness increase with the use of abrasive disks made of cubic boron nitride (CBN).

Cog-wheels were ground on a special bench created on the basis of a gear-grinding machine of model 5891. CBN disks were compared with white electrocorundum disks and chromium electrocorundum ones to determine their working capacity.

The working capacity of CBN disks was assessed according to grinding capacity, roughness of a surface worked, accuracy of involute tooth and disk wear.

The analysis of the results has shown that the working capacity of cog-wheel grinding at machining with CBN disks is twice lower as compared with white electrocorundum disks and 1.5 times lower as compared with chromium electrocorundum. During grind-

ing with CBN disks teeth roughness increases in comparison with electrocorundum disks.

It is defined that after disk accelerated wear in the course of the first pass the value of wear intensity is further stabilized.

The analysis of experiments carried out has shown that a limiting parameter of the accuracy of cog-wheel machining is dimensional wear of a plated disk which is proportional to the number of teeth machined without dressing.

It is also determined that during grinding after the first pass there is formed a wear area $h=30-50\mu\text{m}$ upon a disk cutting edge which corresponds approximately to run-in wear.

Key words: grinding, cog-wheels, plate disks, cubic boron nitride.

Введение

В машиностроении одним из путей реализации задач повышения производительности обработки является широкое применение новых абразивных и алмазных инструментов. Алмазно-абразивная обработка позволяет обеспечить требуемые точность и качество деталей при высокой производительности, а значит, высокую надежность и долговечность машиностроительной продукции в процессе эксплуатации [1]. Все это в полной мере отно-

сится 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. Шлифованием обеспечивается 3–6 степень точности зубчатых колес и шероховатость поверхности $Ra\ 0,20-1,2$ [2].

Шлифуют зубчатые колеса методами обката с непрерывным или периодическим делением и методом копирования с периодическим делением [3]. 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 располагаться параллельно между собой на расстоянии, равном длине общей нормали обрабатываемого колеса (0-градусный метод шлифования), или под различными углами (как правило, 15 или 20°) [3].

При шлифовании методом обката с периодическим делением двумя тарельчатыми кругами (на станках типа Мааg) 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, следу-

Результаты исследований

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 электроэрозийным методом [5]. При этом применялись тарельчатые круги формы 12A2-20° из КНБ зернистостью 125/100. Шлифовали зубчатые колеса из стали ХВГ (62 HRC) с модулем 6 мм, количеством зубьев 21, шириной венца 20 мм.

Работоспособность тарельчатых кругов из КНБ при шлифовании зубчатых колес оценивали по следующим показателям: мощности шлифования (N), шероховатости обработанной поверхности (Ra), точности эвольвентного профиля зуба (f_j), величине

ет отметить, что метод шлифования двумя тарельчатыми кругами наиболее низкопроизводителен. 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) [4]. Шлифование кругами из КНБ по сравнению с обработкой обычными абразивами имеет определенные особенности [4]: 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 ее использовании.

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

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 испытали на работоспособность круги из КНБ на органической связке (12A2 225×3×1,5×40 КРС 125/100 100 % В2-08), белого электрокорунда (12 225×3×40 24А 16 СМ2 6К5) и хромистого электрокорунда (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 кру-

гами из КНБ в 2 раза ниже по сравнению с кругами из белого электрокорунда и в 1,5 раза ниже в сравнении с кругами из хромистого электрокорунда. Процесс шлифования кругами из электрокорунда сопровождался интенсивным износом круга и потерей его режущей способности, что вызывало необходимость правки круга через каждые 3–5 зубьев. Правку кругов из КНБ осуществляли после полного оборота колеса.

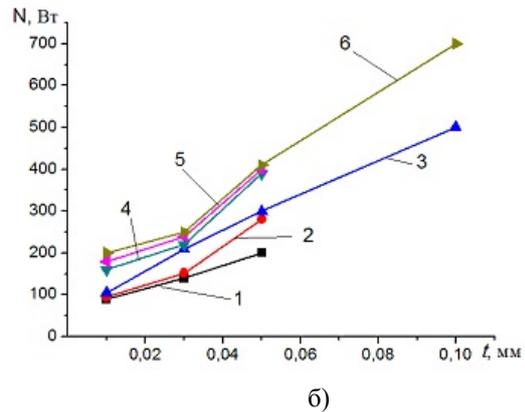
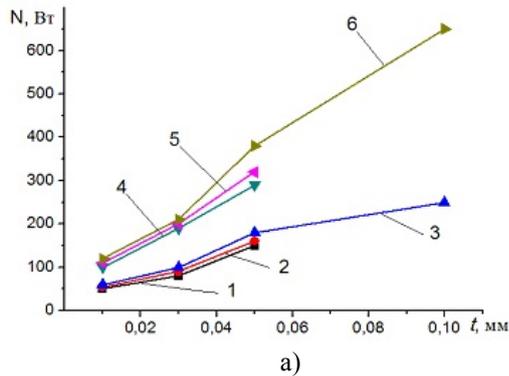


Рис. 1. Графики мощности зубошлифования: а - с охлаждением; б - без охлаждения (1, 4 - при $\tau = 3$ с, 2, 5 - при $\tau = 5$ с, 3, 6 - при $\tau = 8$ с); 1, 2, 3 - круг из КНБ; 4, 5, 6 - круг из электрокорунда)

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 при применении охлаждения и увеличении глубины резания.

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

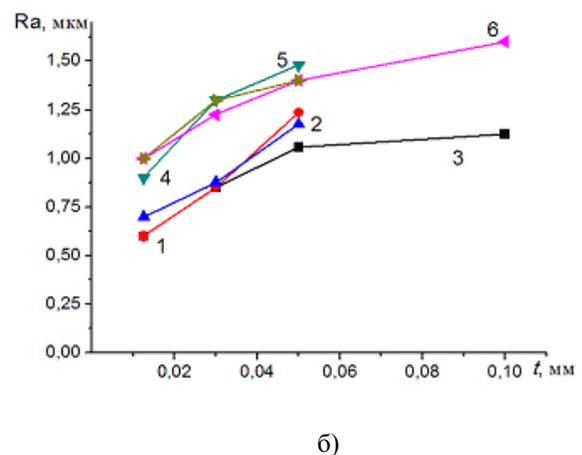
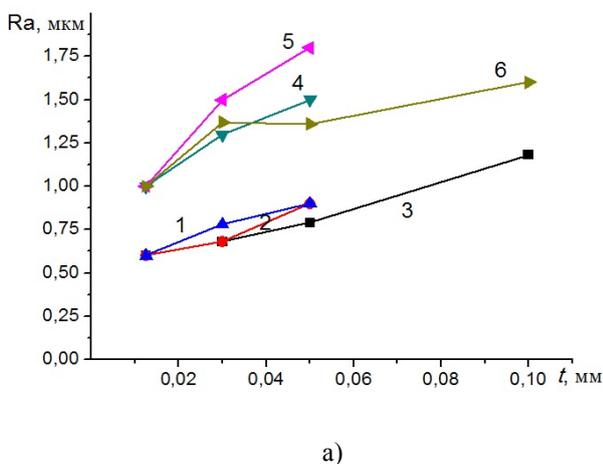


Рис. 2. Графики шероховатости поверхности зуба после обработки: а - с охлаждением; б - без охлаждения (1, 4 - при $\tau = 3$ с, 2, 5 - при $\tau = 5$ с, 3, 6 - при $\tau = 8$ с); 1, 2, 3 - круг из КНБ; 4, 5, 6 - круг из электрокорунда)

Результаты исследования шероховатости показали повышение шероховатости эвольвентной поверхности зубьев ($Ra\ 1,0$) 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 существенно не влияла на шероховатость поверхности, хотя тенденция к повышению шероховатости наблюдалась.

Результаты испытания кругов из КНБ с металлопокрытием зерен (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 $Ra\ 0,65$. 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 рис. 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.

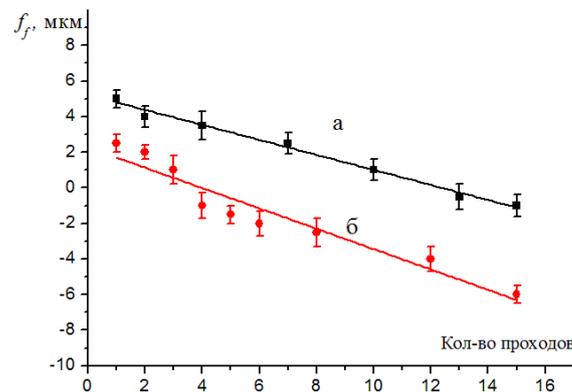


Рис. 3. Зависимость погрешности профиля f_f от количества проходов: а – при $t = 0,05$ мм; б – при $t = 0,02$ мм

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 по-

сле четырех проходов на уровне $105 \pm 1,0$ Вт.

Исследование износа тарельчатых кругов и его влияния на точность эвольвентного профиля зубчатого колеса проводилось 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. 4, 5). Шлифовальный круг работает равномерно без

наступления критического износа. Это характерно как для черного, так и для чистового зубошлифования. В то же время характер изменения погрешности профиля и

мощности шлифования говорит о том, что правка круга на чистовых режимах не требуется.

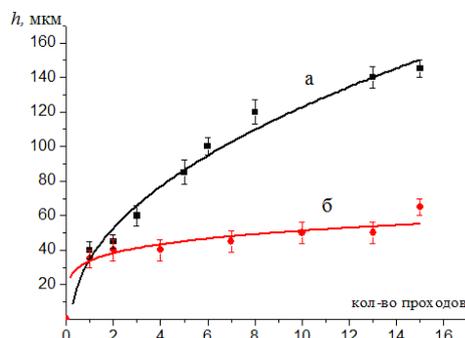


Рис. 4. Зависимость износа круга по торцу h от количества проходов:
а – при $t = 0,05$ мм; б – при $t = 0,02$ мм

Анализ проведенных экспериментов показал, что лимитирующим параметром точности обработки зубчатого колеса является размерный износ тарельчатого круга, который практически пропорционален количеству обработанных зубьев без правки. Изменение износа показывает, что после ускоренного периода приработки круга в течение первого прохода величина его в дальнейшем стабилизируется.

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.

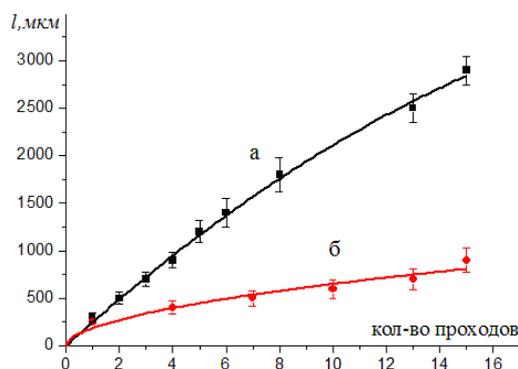


Рис. 5. Зависимость износа круга по диаметру l от количества проходов:
а – при $t = 0,05$ мм; б – при $t = 0,02$ мм

Заключение

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 приработ-

ки 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 формиро-

вать фаску размером до $h = 30$ мкм. Также 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 степень) и шероховатость поверхности $Ra 0,65$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников, А.Н. Абразивная обработка материалов: справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Бенкин, В.А. Прогрессивные методы финишной обработки цилиндрических зубчатых колес: обзор / В.А. Бенкин. – М.: Изд-во НИИМаш, 1989. – 40 с.
3. Сильвестров, Б.Н. Зубошлифовальные работы / Б.Н. Сильвестров. – М.: Высш. шк., 1985. – 272 с.
4. Мишнаевский, Л.Л. Износ шлифовальных кругов / Л.Л. Мишнаевский. – Киев: Наукова думка, 1982. – 192 с.
5. Рябченко, С.В. 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.
1. Reznikov, A.N. *Material Abrasion: reference book* / under the editorship of A.N. Reznikov. – M.: Mechanical Engineering, 1977. – pp. 391.
2. Benkin, V.A. *Advanced Methods for Cylindrical Cog-Wheel Finishing: review* / V.A. Benkin. – M.: Publishing House of RIMach, 1989. – pp. 40.
3. Silvestrov, B.N. *Gear Grinding* / B.N. Silvestrov. – M.: Higher School, 1985. – pp. 272.
4. Mishnaevsky, L.L. *Grinding Disk Wear* / L.L. Mishnaevsky. – Kiev: Scientific Thought, 1982. – pp. 192.
5. Ryabchenko, S.V. Quality analysis of surface machined with CBN disks / S.V. Ryabchenko, Ya.L. Silchenko, V.T. Fedorenko, L.G. Polonsky, V.A. Yanovsky // *Machining in Mechanical Engineering: Transactions*. – Zhitomir: ZhSTU, 2015. – Issue 15. – pp. 167-177.

Статья поступила в редакцию 10.08.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Федоров В.П.

Статья принята к публикации 10.10.18.

Сведения об авторах:

Рябченко Сергей Васильевич, к.т.н., ст. науч. сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, e-mail: s.riabchenko@ukr.net.

Ryabchenko Sergey Vasilievich, Can. Sc. Tech., Senior researcher, Bakul Institute of Super-Hard Materials of NAS of the Ukraine, e-mail: s.riabchenko@ukr.net.