

С.В. Рябченко, Киев, Украина

## **ШЛИФОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС КРУГАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Розглядаються питання підвищення ефективності шліфування високоточних зубчастих коліс 3–4 ступеня точності, заснованої на використанні інструмента з надтвердих матеріалів.*

*Ключові слова: шліфування, високоточні зубчаті колеса, надтверді матеріали*

*Рассматриваются вопросы повышения эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес 3–4 степени точности, основанной на использовании инструмента из сверхтвердых материалов.*

*Ключевые слова: шлифование, высокоточные зубчатые колеса, сверхтвердые материалы*

*The problems of increasing the efficiency of grinding highly precision gearwheels of the 3–4 degree of precision using superhard material tools are discussed.*

*Keywords: grinding, high precision gears, super hard materials*

**Введение.** Зубошлифование является одним из методов финишной обработки закаленных зубчатых колес. Шлифование высокоточных зубчатых колес 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 3–4-й степени точности с шероховатостью поверхности  $Ra = 1,0–0,2$  мкм [1].

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

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 КНБ при шлифовании зубчатых колес.

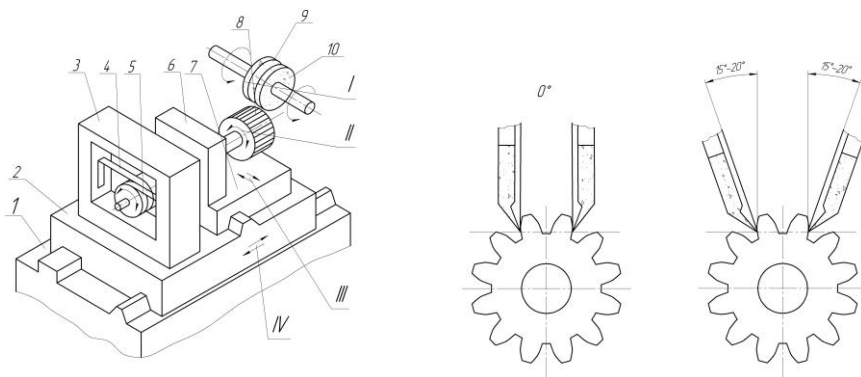


Рисунок 1 – Метод зубошлифования зубчатых колес непрерывной обкаткой двумя тарельчатыми кругами

**Целью** исследований является повышение производительности шлифования высокоточных зубчатых колес тарельчатыми кругами из КНБ при сохранении точности и качества зубчатых колес.

**Основная часть.** Экспериментальные исследования процесса шлифования зубчатых колес проводились 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 был настроен на  $0^\circ$  градусный 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.

Для исследования процесса шлифования были выбраны тарельчатые круги типа 12A2-20° размером 225x3x3x40 из КНБ марки КР, зернистостью 125/100 на органической (B2-08), керамической (C10) и металлической (M2-09) связках. Шлифовались зубчатые колеса из стали ХВГ (62 HRC) модулем  $m = 6$  мм, числом зубьев  $z = 21$  зуб, шириной венца  $B = 20$  мм.

Оценку работоспособности тарельчатых кругов проводили по следующим показателям: мощность шлифования ( $N$ ), шероховатость обработанной поверхности ( $Ra$ ), точность эвольвентного профиля зуба ( $f_j$ ) и износ круга ( $h$ - по торцу и  $l$ - по диаметру).

Предварительно испытали на работоспособность кругов из КНБ на органической связке (круги 12A2 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. 2, а, без охлаждения – на рис. 2, б.

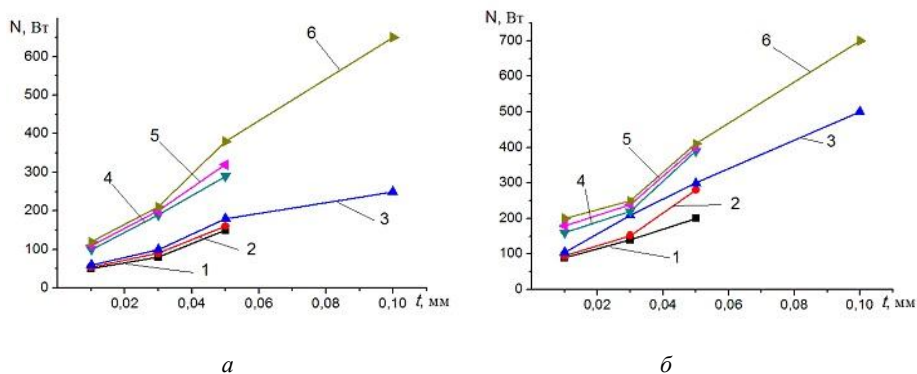


Рисунок 2 – Графики мощности зубошлифования:  
 а - с охлаждением; б - без охлаждения  
 (1, 4 при  $\tau = 3$  с; 2, 5 при  $\tau = 5$  с; 3, 6 при  $\tau = 8$  с);  
 1, 2, 3 – круги из КНБ; 4, 5, 6 – круги из электрокорунда

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 ( $Ra$ ) эвольвентной поверхности зубчатых колес. Графики изменения шероховатости поверхности зубчатых колес после обработки без охлаждения показаны на рис. 3, а, с охлаждением – на рис. 3, б.

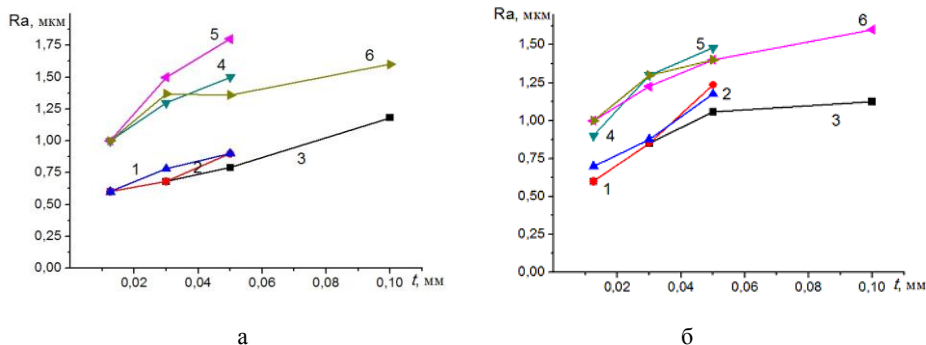


Рисунок 3 – Графики шероховатости поверхности зуба после обработки: а - с охлаждением; б - без охлаждения

(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 не существенно влияла на шероховатость поверхности, хотя тенденция к повышению шероховатости наблюдалась.

Результаты испытания кругов из КНБ с металлопокрытием зерен (круги 12А2 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. 4. 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.

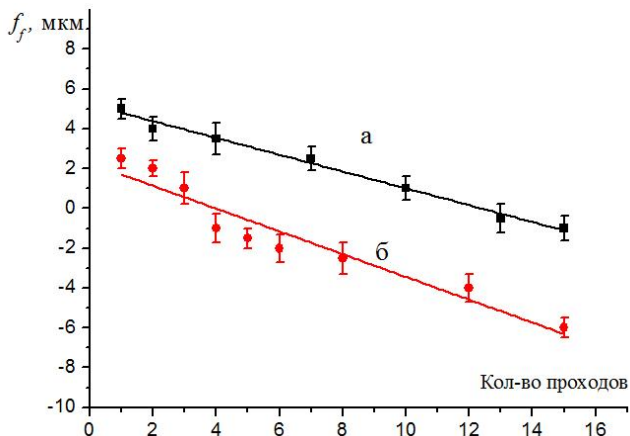


Рисунок 4 – График зависимости изменения погрешности профиля  $f_f$  от количества проходов (а – при  $t = 0,05$  мм, б – при  $t = 0,02$  мм)

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

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. 5, б). Шлифовальный круг работает равномерно без наступления критического износа. Это характерно как для черногового, 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.

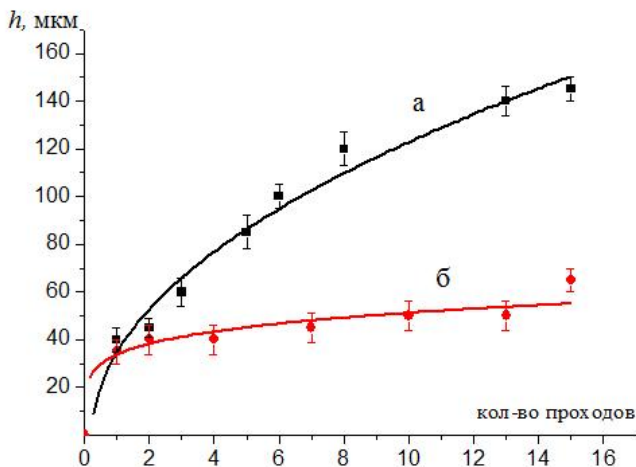


Рисунок 5 – Зависимость износа круга по торцу  $h$  от количества проходов (а – при  $t = 0,05$  мм, б – при  $t = 0,02$  мм)

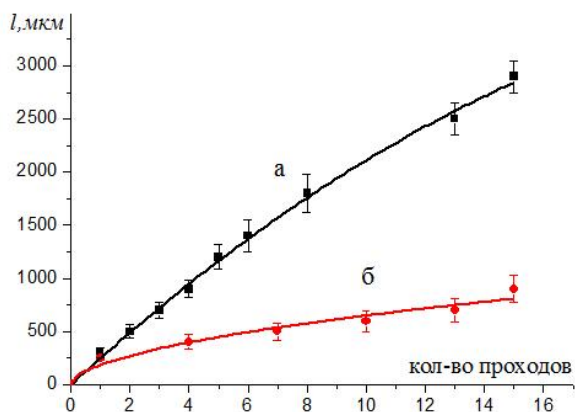


Рисунок 6 – Зависимость износа круга по диаметру  $l$  от количества проходов (а – при  $t = 0,05$  мм, б – при  $t = 0,02$  мм)

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 прирабочному износу. Аналогичный результат получен при финишном шлифовании зубчатых колес, однако площадка износа, гораздо меньшая - до  $h = 30$  мкм.

**Список использованных источников:** 1. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес / Э.Н. Гулида. – Львов: Изд. об-ние "Вища школа", 1977. – 168 с. 2. Высокопроизводительное зубошлифование кругами из кубического нитрида бора / Л.Л. Мишнаевский, А.А. Сагарда, В.М. Емельянов и др. // Синтетические алмазы. – 1970. – №5. – с. 40 – 42. 3. Эльбор в машиностроении / Под. ред. В.С. Лысанова – Л. Машиностроение. 1978.– 280 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.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gulida Je.N. Tehnologija odlochnyh operacij zuboobrabotki cilindricheskikh koles / Je.N. Gulida. – L'vov: Izd. ob-nie "Vishha shkola", 1977. – 168 s. 2. Vysokoproizvoditel'noe zuboshlifovanie krugami iz kubicheskogo nitrida bora / L.L. Mishnaevskij, A.A. Sagarda, V.M. Emel'janov i dr. // Sinteticheskie almazy. – 1970. – №5. – s. 40 – 42. 3. Jel'bor v mashinostroenii / Pod. red. V.S. Lysanova – L. Mashinostroenie. 1978.– 280 S. 4. Mishnaevskij L.L. Iznos shlifoval'nyh krugov/ L.L. Mishnaevskij – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 192 s. 5. Rjabchenko S.V. Issledovanie kachestva obrabatyvaemoj poverhnosti zubchatyh koles posle shlifovanija krugami iz KNB / S.V. Rjabchenko, Ja.L. Sil'chenko, V.T.Fedorenko, L.G. Polonskij, V.A. Janovskij // Procesi mehanichnoї obrobki v mashinobuduvanni, Zb. nauk. prac'. Zhitomir ZhDTU, 2015. – Vip. 15. S. 167-177.

*Поступила в редколлегию 25.06.2018*