

УДК 621.921

С.В. Рябченко, Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТАРЕЛЬЧАТЫМИ КРУГАМИ ИЗ КНБ

Розглядаються проблеми підвищення ефективності шліфування високоточних зубчастих коліс 3-4 ступеня точності з використанням інструментів з cBN. Досліджується ефективність тарельчастих кругів з кубічного нітриду бору на різних зв'язках.

Рассматриваются проблемы повышения эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес 3-4 степени точности с использованием инструментов из cBN. Исследуется эффективность тарельчатых кругов из кубического нитрида бора на различных связках.

The problems of increasing the efficiency of grinding highly precision gearwheels of the 3–4 degree of precision using cBN tools are discussed. The efficiency of cubic boron nitride dish grinding wheels in various bonds has been studied.

Одним из главных направлений совершенствования процессов современной механической обработки является повышение эффективности изготовления деталей машин. Эффективность механической обработки определяется повышением производительности обработки, обеспечением качества и точности обработанных деталей, способностью инструмента сохранять свою износостойкость в период обработки детали. 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.

Перспективным путем дальнейшего развития методов шлифования высокоточных зубчатых колес в значительной мере связано с применением инструмента из кубического нитрида бора (КНБ) [1]. Шлифование кругами из КНБ по сравнению с обработкой обычными абразивами имеет свои особенности: – шлифовальные круги из КНБ имеют существенно более высокая износостойкость; – их использование обеспечивает повышение качества поверхностного слоя обработанных изделий; – создается возможность шлифования без правки кругов или при минимальном его использовании [2].

Исследование процесса шлифования осуществляли на специальном стенде, созданном на базе зубошлифовального станка модели 5891 [3]. 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 – $t = 0,01\text{--}0,1$ мм, время обката на одном зубе – $\tau = 3\text{--}10$ с.

Работоспособность тарельчатых кругов оценивали следующими показателями: эффективной мощностью шлифования ($N_{\text{эф}}$), 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 .

Предварительно испытывались на работоспособность круги из кубического нитрида бора на органической связке 12A2 225×3×1,5×40 КРС 125/100 100 % В2-08, электрокорунда 24А 16 СМ2 6К5 и хромистого электрокорунда марки А89 16 СМ2 6К5. В качестве охлаждающей жидкости использовалось масло "Индустриальное 12". Результаты испытаний показаны в табл. 1.

Таблица 1 – Мощность $N_{\text{эф}}$ зубошлифования с охлаждением

Шлифовальный круг	Время τ , с	Глубина шлифования t , мм			
		0,01	0,03	0,05	0,1
Круг из КНБ	3	50	80	150	
	5	55	90	160	
	8	60	100	180	250
Круг из электрокорунда белого	3	100	190	290	
	5	110	200	320	
	8	120	210	380	650
Круг из электрокорунда хромистого	3	80	150	220	
	5	90	170	250	
	8	110	190	300	450

Анализ результатов шлифования показал, что эффективная мощность шлифования зубчатых колес в процессе обработки кругами из кубического нитрида бора в 2 раза меньше, чем при обработке кругами из электрокорунда белого и 1,5 раза меньше, чем при обработке кругами из электрокорунда хромистого. Процесс шлифования кругами из электрокорунда сопровождался интенсивным износом круга и потерей их режущей способности, что вызывало необходимость правки круга через каждые 3-5 зубьев. Правка кругов из КНБ осуществлялась после полного оборота колеса.

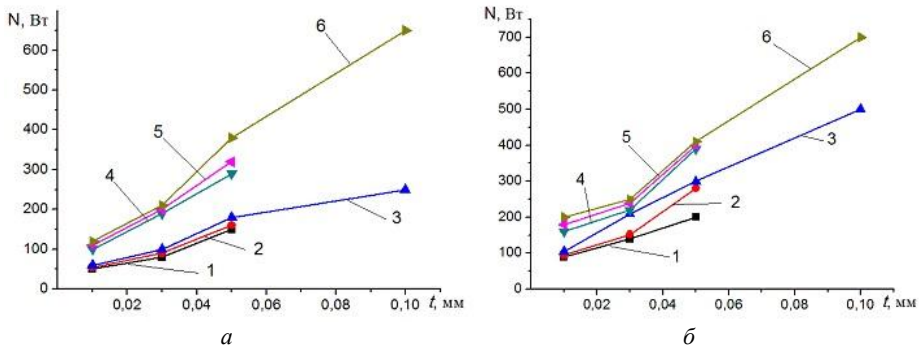


Рисунок 1 – Мощность зубошлифования с охлаждением (а) и без охлаждения (б)

(1, 4 при $\tau = 3$ с; 2, 5 – $\tau = 5$ с; 3, 6 – $\tau = 8$ с)

1, 2, 3 – круг из КНБ; 4, 5, 6 – круг из электрокорунда

Обработка результатов исследования эффективной мощности, позволила получить зависимость мощности зубошлифования от глубины резания и времени обката. Графики зависимости мощности шлифования зубчатого колеса кругами из электрокорунда и кубического нитрида бора с охлаждением (рис. 1, а) и без него (рис. 1, б) приведены на рисунках. Анализ результатов показывает, что интенсивное охлаждение снижает мощность шлифования при использовании шлифовальных 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 в 1,5-2 раза. Причем эта разница имеет тенденцию к увеличению с использованием охлаждения и повышению глубины резания.

Параллельно с исследованием кругов на работоспособность по критерию мощности шлифования, проводилась оценка шероховатости (Ra) эвольвентной поверхности зубчатых колес. Приведены графики изменения шероховатости поверхности зубчатых колес после обработки без охлаждения (рис. 2, а) и с охлаждением (рис. 2, б).

Анализируя результаты исследований шероховатости, заметна высокая шероховатость эвольвентной поверхности зубьев $Ra 1,0$ при шлифовании кругами из КНБ. Большая шероховатость микронеровностей при шлифовании зубчатых колес кругами из КНБ объясняется присутствием агрегированных зерен кубического нитрида бора с покрытием стеклом размером до 0,5-1 мм. На всех исследуемых режимах обработки характерно увеличение шероховатости поверхности при уменьшении времени обката зубчатого

колеса, причем при работе без охлаждения эта тенденция более выражена. Заметна также более высокая разница в шероховатости при работе с охлаждением между электрокорундом и кубическим нитридом бора. Так при работе без охлаждения разница в среднем составляет 20 %, а при работе с охлаждением до 45 %. Глубина резания на всех исследуемых диапазонах не оказывала существенного влияния на шероховатость поверхности, хотя тенденция к возрастанию шероховатости наблюдалась, причем для кругов из электрокорунда более характерно.

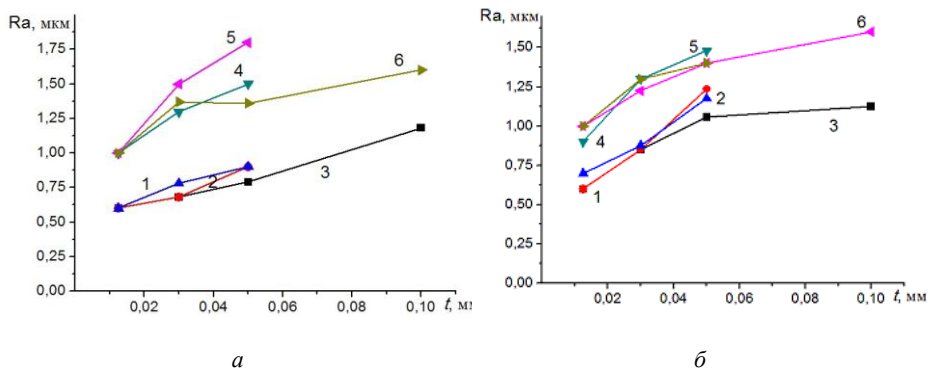


Рисунок 2 – Шероховатость поверхности зуба после обработки с охлаждением (а) и без охлаждения (б)
(1, 4 при $\tau = 3$ с; 2, 5 – $\tau = 5$ с; 3, 6 – $\tau = 8$ с)
1, 2, 3 – круг из КНБ; 4, 5, 6 – круг из электрокорунда

Испытание кругов из КНБ с металлопокрытием зерен (12A2 225×3×3×40 КРМ 125/100 100 % В2-08) показало, что шероховатость зуба уменьшалась в 2 раза по сравнению с кругами из КНБ с покрытием стеклом и составляла $R_a 0,65$. Мощность шлифования возрастает на 10–20 %, а износ кругов находится на одном уровне с кругами из КНБ с покрытием стеклом.

Исследования работоспособности при зубошлифовании тарельчатых кругов на керамических и металлических связках производился только при интенсивном охлаждении зоны шлифования. Предварительные испытания показали, что при работе без охлаждения на поверхности зубчатого колеса мгновенно образуются прижоги, а круги теряют режущую способность. Показатели мощности шлифования кругами из КНБ приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Мощность $N_{эф.}$ шлифования круг из КНБ на керамической связке С10

Движение шлифования	Время τ , с	Глубина шлифования t , мм			
		0,01	0,03	0,05	0,1
Прямой ход	3	60	100	180	
	5	65	115	190	
	8	75	120	210	300
Обратный ход	3	50	85	110	
	5	55	90	120	
	8	60	100	130	200

Зависимость мощности шлифования при прямом и обратном ходе каретки станка от глубины резания и времени обката при шлифовании кругами из КНБ на керамической связке С10 (12А2 225×3×40 КР 125/100 100 % С10), показано на рис. 3.

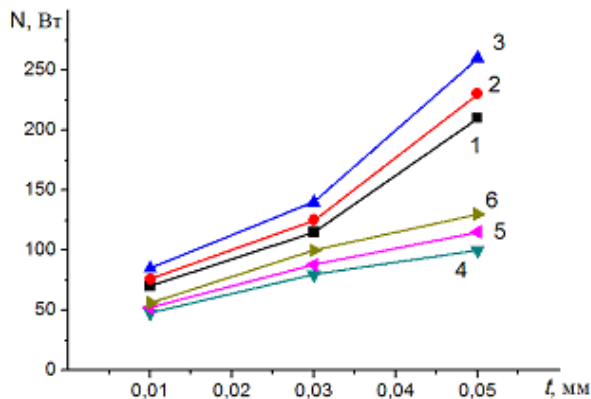


Рисунок 3 – Мощность зубошлифования с охлаждением круг КНБ на керамической связке С10
(1, 4 при $\tau = 3$ с; 2, 5 – $\tau = 5$ с; 3, 6 – $\tau = 8$ с)
1, 2, 3 – прямой ход; 4, 5, 6 – обратный ход

Отношение мощности шлифования на обратном ходе к мощности на прямом ходе каретки характеризует коэффициент режущей способности круга, чем он меньше, тем режущая способность круга выше.

Анализ результатов, показал, что мощность шлифования кругами из КНБ на керамической связке на 15-20 % выше по сравнению со шлифованием кругами

из КНБ на органических связках. Мощность шлифования практически не зависит от времени обката зубчатого колеса, хотя тенденция роста мощности заметна при уменьшении времени обката. Эта тенденция сохраняется, как на прямом, так и на обратном ходе каретки. Глубина резания существенно влияет на мощность шлифования и составляет $N_{эф} = 65 \pm 1,0$ Вт при $t = 0,01$ мм до $N_{эф} = 210 \pm 1,0$ Вт при $t = 0,05$ мм. Отношение мощности обратного хода к прямому составляет от 0,55 до 0,45, причем большее значение приходится на меньшую глубину шлифования, а меньшее – на большую. Шероховатость поверхности зубчатого колеса на всех исследуемых режимах находилась в пределах Ra 0,63-0,68. При этом 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 керамической связке обеспечивает высокую точность эвольвентного профиля зуба $f_f = 4,0 \pm 0,5$ мкм (зубья 1, 2, 5, 6, 9, 18, 21) по сравнению с исходным профилем $f_f = 8,0 \pm 0,5$ мкм (зубья 3, 4, 7, 8, 10–15) (рис. 4).

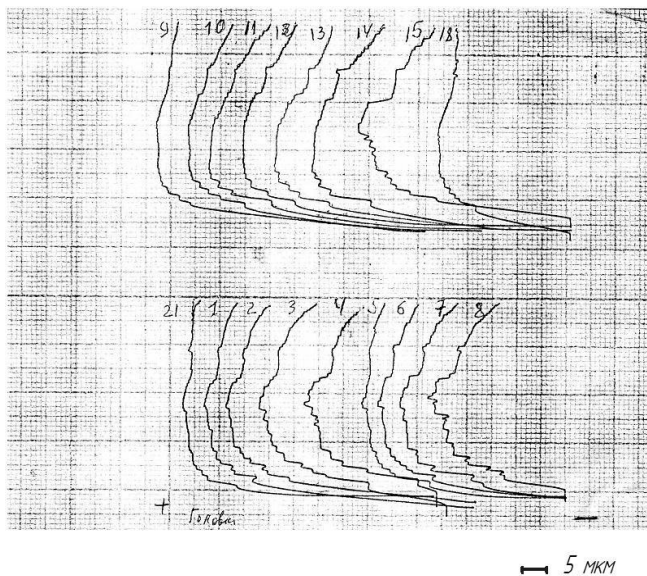


Рисунок 4 – Эвольвентограмма зубчатого колеса после шлифования кругом КНБ на керамической связке С10

Исследование работоспособности тарельчатых кругов из КНБ на металлической связке (12A2 225×3×3×40 КР 125/100 100 % М2-09) производилось с использованием правки круга электроэрозионным методом. Показатели мощности шлифования кругами из КНБ приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Мощность $N_{эф}$ шлифования круг из КНБ на металлической связке М2-09

Движение шлифования	Время τ , с	Глубина шлифования t , мм			
		0,01	0,03	0,05	0,1
Прямой ход	3	65	110	195	260
	5	70	120	200	280
	8	80	130	230	320
Обратный ход	3	50	70	100	210
	5	50	70	95	205
	8	55	75	100	200

Зависимость мощности шлифования при прямом и обратном ходе каретки станка от глубины резания и времени обката, показана на рис. 5.

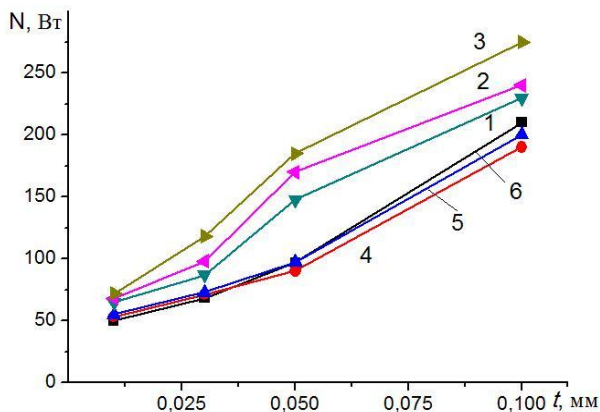


Рисунок 5 – Мощность зубошлифования с охлаждением круг КНБ на металлической связке М2-09
(1, 4 – при $\tau = 3$ с; 2, 5 – $\tau = 5$ с; 3, 6 – $\tau = 8$ с)
1, 2, 3 – прямой ход; 4, 5, 6 – обратный ход

Анализ результатов показал, что мощность шлифования кругами из КНБ на металлической связке на 20-30 % выше по сравнению со шлифованием кругами из КНБ на органических связках. Мощность шлифования практически не зависит от времени обката зубчатого колеса, хотя тенденция роста заметна при его уменьшении. Глубина резания существенно влияет на мощность шлифования и составляет от $N_{эф} = 70 \pm 1,0$ Вт при $t = 0,01$ мм до $N_{эф} = 260 \pm 1,0$ Вт при $t = 0,1$ мм. Отношение мощности обратного хода к прямому составляет от 0,7 до 0,65, причем большее

значение приходится на меньшую глубину шлифования, а меньшее – на большую. Шероховатость поверхности зубчатого колеса на всех исследуемых режимах находилась в пределах Ra 0,7–0,75. При этом 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 $f_f = 5,0 \pm 0,5$ мкм (зубья 1, 9, 13, 18) по сравнению с исходным профилем зуба $f_f = 8,0 \pm 0,5$ мкм (зубья 12, 16, 21) (рис. 6).

Выхаживание не дает заметного улучшения точности эвольвентного профиля зубчатого колеса после одного чернового прохода (зуб 20). Для получения высокой точности эвольвентного профиля необходимо проведение 2-3 чистовых проходов (зуб 17) и последующее выхаживание (зуб 18). Шлифование зубчатых колес кругами из КНБ на металлических связках обеспечивает разность соседних шагов зубчатого колеса 2-4 мкм, что также является показателем высокой точности.

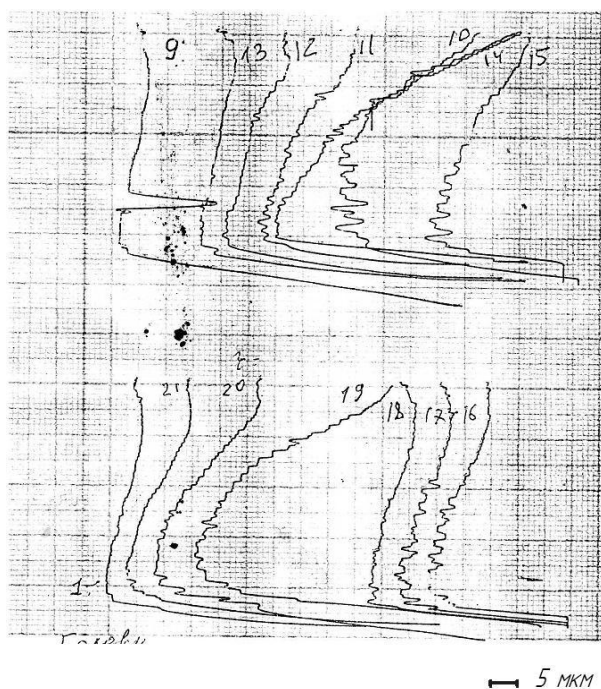


Рисунок 6 – Эвольвентограмма зубчатого колеса после шлифования кругом КНБ на металлической связке М2-09

Дальнейшие исследования процесса шлифования были направлены на определение износа тарельчатых кругов из КНБ. Исследовалась общая закономерность износа тарельчатого шлифовального круга из КНБ и точность обработки эвольвентного профиля зубчатого колеса.

На рис. 7 приведен график изменения погрешности профиля f_f в зависимости от количества обработанных зубьев. Возрастание погрешности профиля до $f_f = 14 \pm 0,1$ мкм после шлифования первых 2-3 зубьев объясняется деформацией технологической системы от усилий резания. При дальнейшем шлифовании зубчатого колеса на первом проходе погрешность профиля составляет $f_f = 10,0 \pm 0,5$ мкм.

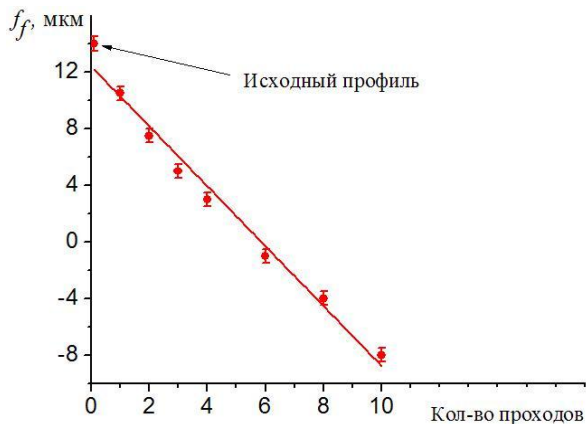


Рисунок 7 – Изменение погрешности профиля f_f от количества проходов

Плавное снижение погрешности на последующих проходах можно объяснить компенсацией этих деформаций износом круга, что подтверждается резким отрицательным отклонением профиля, полученным в результате выхаживающих проходов после 10-ти циклов с глубиной резания $t = 0,05$ мм.

Характер изменения мощности по проходам (рис. 8) показывает уменьшение мощности на первом проходе с $150 \pm 1,0$ Вт до $130 \pm 1,0$ Вт и затем снижение до $120 \pm 1,0$ Вт и стабилизацию мощности шлифования после четырех проходов на уровне $105 \pm 1,0$ Вт.

Анализ графиков погрешности профиля зуба и мощности резания говорит о том, что при обработке зубчатого колеса режущая способность круга не снижается. Происходит размерный износ круга, о чем говорит изменение величин $l = 2,2$ мм и $h = 0,13$ мм соответственно, а также

изменение фактического съема после каждого прохода (коэффициент съема припуска в среднем изменился с 0,5 до 0,7).

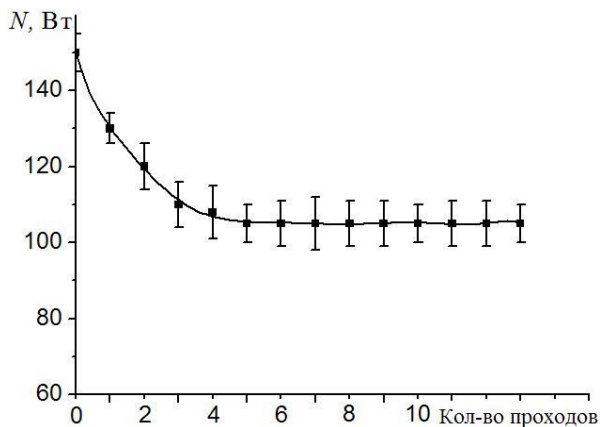


Рисунок 8 – Зависимость изменения мощности от количества проходов

В результате исследований установлено, что при черновом шлифовании после первого прохода на режущей кромке круга формируется площадка износа размером $h = 30\text{--}50$ мкм, который соответствует величине приработочного износа. Аналогичный результат получен при финишном шлифовании зубчатых колес: на режущей кромке круга формируется площадка износа, однако, гораздо меньшего размера до $h = 30$ мкм.

Анализ результатов изменения мощности шлифования показал, что в течение всей обработки мощность резания практически остается на одном уровне. Не изменяется и фактический съем материала, который находится в пределах 0,61–0,5. Это обстоятельство говорит о том, что в процессе шлифования зубчатых колес тарельчатый круг из КНБ работает в режиме самозатачивания. Изменяются только геометрические параметры шлифовального круга за счет его износа. Для уменьшения периода приработки шлифовального круга из КНБ на режущей кромке необходимо предварительно, за счет осуществления соответствующей правки, формировать фаску размером $h = 0,03\text{--}0,05$ мм.

Список использованных источников: 1. Рябченко С.В. Повышение эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес кругами из КНБ / С.В. Рябченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – Вип. 23. – С. 95–102. 2. Новиков Н.В. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. В 6 т. / под общ.

ред. *Н.В. Новикова*. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины; ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2003. – Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / отв. ред. *А.А. Шепелев*. – 2007. – 340с. 3. *Рябченко С.В.* Износ кругов из СТМ при зубошлифовании / *С.В. Рябченко* // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2008. – Вып.75. – С. 343-348.

Bibliography (transliterated): 1. Rjabchenko S.V. Povyshenie jeffektivnosti shlifovanija vysokotochnyh zubchatyh koles krugami iz KNB / S.V. Rjabchenko // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem : zb. nauk. prac'. – Kramators'k : DDMA, 2008. – Vip. 23. – S. 95-102. 2. Novikov N.V. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie. V 6 t. / pod obshh. red. N.V. Novikova. – K. : ISM im. V.N. Bakulja NAN Ukrainy; IPC «ALKON» NAN Ukrainy, 2003. – Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / отв. ред. *А.А. Шепелев*. – 2007. – 340с. 3. Rjabchenko S.V. Iznos krugov iz STM pri zuboshlifovanii / S.V. Rjabchenko // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah : mezhhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov : NTU "HPI", 2008. – Вып.75. – С. 343-348.