

С.В. Рябченко, н.с.
 В.Т. Федоренко, ведущий инженер
 Я.Л. Сильченко, ведущий инженер
 Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля
 НАН Украины
 Л.Г. Полонский, проф.
 В.А. Яновский, доц.
 Житомирский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПОСЛЕ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ КНБ

Рассматриваются вопросы повышения качества шлифования высокоточных зубчатых колес 3–4 степени точности, основанной на использовании инструмента из КНБ. Технология направлена на повышение эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес из закаленных сталей за счет управления контактным взаимодействием тарельчатого круга с эвольвентным профилем зуба в зоне шлифования путем выбора абразивного материала инструмента и условий обработки.

***Ключевые слова:** зубошлифование; круги из КНБ; шероховатость поверхности; остаточные напряжения; структура поверхностного слоя*

Постановка проблемы. Шлифование прецизионных и высокоточных зубчатых колес производится по методу обката на зубошлифовальных станках, работающих двумя абразивными кругами. Зубошлифование двумя тарельчатыми кругами позволяет получать зубчатые колеса 4–5 степени точности с шероховатостью поверхности Ra 1,0–0,3 [1]. Одним из путей повышения качества обработки зубчатых колес является применение для зубошлифования кругов из кубического нитрида бора (КНБ) [2].

Целью работы является исследование качества обработки зубчатых колес после шлифования тарельчатыми кругами из КНБ.

Изложение основного материала. Шлифование зубчатых колес осуществляли на специальном стенде, созданном на базе зубошлифовального станка модели 5891 [3]. 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.

Шлифование осуществляли кругами типа 12A2-20° 225×3×3×40 КР 125/100 на органической (В2-08), керамической (С10) и металлической (М2-09) связках. Шлифовали зубчатые колеса из стали ХВГ (60 *HRC*) модуль $m = 6$ мм, число зубьев $z = 21$ зуб, ширина венца $B = 20$ мм. Результаты исследований качества зубчатых колес после шлифования кругами из КНБ сравнивались с результатами шлифования кругами из электрокорунда белого и хромистого, наиболее часто применяемых при шлифовании зубчатых колес.

Шероховатость поверхности по *Ra* определяли профилографом «Суртроник-3Р» вдоль эвольвенты зуба в 3-х точках. Шероховатость поверхности определялось с точностью 0,01 мкм. Результаты замеров приведены в таблице 1.

Таблица 1
Шероховатость *Ra* (мкм) зубчатых колес после шлифования

Шлифовальный круг	Время τ , с	Глубина шлифования t , мм			
		0,01	0,03	0,05	0,1
Круг из КНБ со стеклопокрытием, связка В2-08	3	1,00	1,30	1,50	
	5	1,00	1,50	1,80	
	8	1,10	1,40	1,40	1,70
Круг из КНБ с металлопокрытием, связка В2-08	3	0,65	0,70	0,90	
	5	0,60	0,60	0,90	
	8	0,50	0,55	0,90	0,90
Круг из КНБ, связка С10	3	0,70	0,80	0,95	
	5	0,65	0,80	0,96	
	8	0,60	0,75	0,90	1,10
Круг из КНБ, связка М2-09	3	0,70	0,85	1,10	
	5	0,68	0,80	1,00	
	8	0,65	0,80	0,90	1,20
Круг из электрокорунда белого	3	0,60	0,70	0,90	
	5	0,60	0,80	0,90	
	8	0,60	0,70	0,80	0,90
Круг из электрокорунда хромистого	3	0,62	0,75	0,93	
	5	0,62	0,80	0,90	
	8	0,60	0,75	0,85	0,95

Результаты показали, что шероховатость эвольвентной поверхности при шлифовании кругами из КНБ на органической связке В2-08 при черновых режимах обработки достигает *Ra* 1,50–1,70. При финишном шлифовании кругами из КНБ на органической связке В2-08

шероховатость эвольвентной поверхности составляет значения Ra 1,00–1,10. Такое значение шероховатости при шлифовании кругами из КНБ объясняется присутствием агрегированных зерен КНБ с покрытием стеклом размером до 0,5–1 мм.

Шлифование кругами из КНБ на керамической связке С10 снижает шероховатость эвольвентной поверхности зубчатого колеса до 30 % и достигает значений Ra 0,60–0,70 на финишных режимах.

Аналогичное снижение шероховатости наблюдается при шлифовании кругами из КНБ на металлической связке, которое составляет на финишных режимах Ra 0,65–0,75. Имея одинаковую зернистость 125/100, шлифовальные круги из КНБ на керамической связке обеспечивают меньшую шероховатость, чем круги на металлической связке.

Это объясняется большей твердостью металлической связки, и в результате шероховатость шлифованной эвольвентной поверхности зубчатого колеса несколько выше. Применение кругов из КНБ той же зернистости (125/100) на органической связке В2-08 позволяет значительно снизить шероховатость обработанной поверхности и получить результат равный Ra 0,50–0,65. Эти результаты подтверждаются замерами шероховатости после шлифования кругами из КНБ на органической связке с металлическим покрытием зерен, где не образуются агрегированные зерна большого размера.

На всех исследуемых режимах обработки характерно увеличение шероховатости поверхности при уменьшении времени обката зубчатого колеса. Заметна более высокая разница в шероховатости после шлифования кругами из электрокорунда и КНБ, которая составляет до 20 %. Применение хромистого электрокорунда повышает шероховатость эвольвентного профиля зубчатого колеса до 10 % по сравнению с кругом из электрокорунда белого. Это объясняется более высокой твердостью порошка хромистого электрокорунда. Глубина резания на всех исследуемых диапазонах не оказывала существенного влияния на шероховатость поверхности. Хотя тенденция к возрастанию шероховатости поверхности при повышении глубины резания наблюдалась, причем для кругов из электрокорунда более заметно.

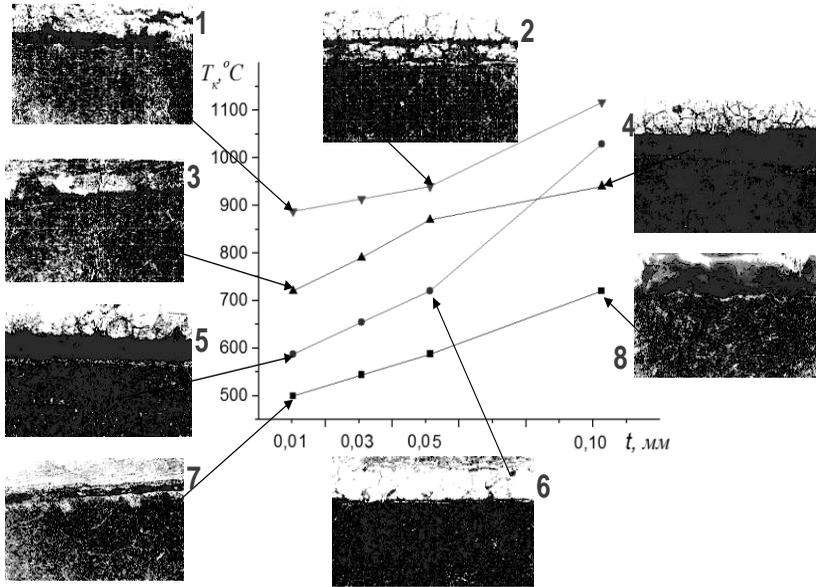


Рис. 1. Структура поверхнового слоя зубчатых колес из стали ХВГ после обработки кругом из электрокорунда белого:

1 – $t = 0,01$ мм $\tau = 5$ с, без СОТС;

2 – $t = 0,05$ мм $\tau = 5$ с, без СОТС;

3 – $t = 0,01$ мм $\tau = 5$ с, с СОТС;

4 – $t = 0,1$ мм $\tau = 8$ с, с СОТС;

после обработки кругом из КНБ: 5 – $t = 0,01$ мм, $\tau = 5$ с, без СОТС;

6 – $t = 0,05$ мм, $\tau = 5$ с, без СОТС;

7 – $t = 0,01$ мм, $\tau = 5$ с, с СОТС;

8 – $t = 0,1$ мм, $\tau = 8$ с, с СОТС

Металлографические и рентгеноструктурные исследования поверхностного слоя зубчатых колес показали, что шлифование кругами из КНБ с охлаждением при $t = 0,01$ мм приводит к формированию поверхностного слоя зубьев с микроструктурой, не отличающейся от структуры глубинных слоев металла (рис. 1, 7). При послойном рентгеноструктурном анализе в железном и медном излучении градиент концентрации остаточного аустенита в поверхностном слое отсутствует, практически одинакова и ширина рентгеновских линий.

Следовательно, при финишном шлифовании зубчатых колес кругом из КНБ с охлаждением температура в зоне обработки

значительно ниже точки A_{1c} и изменение структуры не обнаруживается используемыми методами исследований.

При глубине шлифования $t = 0,03$ мм (в железном излучении) наблюдается рост количества остаточного аустенита, а при $t = 0,05$ мм (в медном излучении) наблюдается тонкий слой металла, обогащенного аустенитом. Дальнейшее повышение глубины резания до 0,1 мм приводит к образованию слоя вторичной закалки, что ясно видно по количеству остаточного аустенита (в железном излучении) и появлению отдельных участков слоя вторичной закалки (рис. 1, 8). Характерно, что рентгенограммы поверхности в железном излучении после шлифования кругом из КНБ без охлаждения с глубиной до 0,03 мм существенно не отличаются от рентгенограмм, снятых при работе с охлаждением. Только в медном излучении наблюдается заметное повышение количества остаточного аустенита, а на микрошлифах после шлифования с $t = 0,05$ мм видны следы вторичной закалки (рис. 1, 6).

Исследования состояния поверхности зубьев после шлифования кругами из белого электрокорунда без охлаждения показало, что температура на всех режимах выше, чем в случае обработки кругами из КНБ. При минимальной глубине резания $t = 0,01$ мм в железном излучении наблюдается существенное сужение рентгеновских линий и повышение до 25 % количества остаточного аустенита (рис. 1, 1).

В медном излучении виден рост содержания аустенита до 50 % и уширение линий (110)-фазы. По мере увеличения глубины резания ширина линий фазы при съеме в железном излучении снижается, а в медном – возрастает. Указанное характерно для поверхности, в которой участки вторичной закалки чередуются с участками вторичного отпуска, что подтверждается и данными металлографических исследований. При $t = 0,05$ мм линии (110)-фазы в медном излучении настолько размыты, что определить их ширину не предоставляется возможным (рис. 1, 2). Содержание остаточного аустенита в этом случае превышает 50 %. При $t = 0,01$ мм с охлаждением металлографическим снимком наблюдается сравнительно тонкий слой вторичной закалки (рис. 1, 3).

Однако ширина рентгеновских линий и содержание остаточного аустенита, как в железном, так и в медном излучении примерно идентична возникающим при обработке кругом из КНБ с глубиной резания 0,05 и 0,03 мм (соответственно работа с охлаждением и без него). Дальнейшее повышение глубины резания до 0,1 мм приводит к образованию слоя вторичной закалки (рис. 1, 4).

В результате комплексного металлографического и рентгеноструктурного анализов поверхностного слоя зубчатых колес установлено, что шлифование с глубиной резания $t = 0,1$ мм и более нецелесообразно, так как глубина дефектного слоя превышает припуск на обработку и составляет 200 мкм, который не может быть удален на последующих финишных операциях обработки. При шлифовании кругами из КНБ без охлаждения такая величина дефектного слоя возникает уже при глубине резания более 0,05 мм. Поэтому черновое шлифование зубчатых колес из железоуглеродистых сталей кругами из КНБ с $t = 0,05$ мм без охлаждения нецелесообразно, ввиду образования дефектного слоя, не удаляемого на последующих финишных операциях обработки. Черновое шлифование зубчатых колес с $t = 0,05$ мм кругами из КНБ возможно с применением охлаждения, так как дефектный слой в этом случае составляет всего 20–30 мкм, который вполне можно удалить при следующих финишных операциях зубошлифования.

Одновременно с металлографическими и рентгенографическими исследованиями изучалось распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя зубчатых колес.

Учитывая, что используемая в экспериментах аппаратура для определения остаточных напряжений давала достоверные данные, начиная с глубины слоя 4–5 мкм, можно говорить лишь о тенденции изменения напряжений в первой зоне эпюры, а не о количественных величинах этого изменения в зависимости от условий шлифования. В то же время можно количественно характеризовать величины напряжений и характер их распределения во второй и третьей зонах эпюры (рис. 2).

В результате исследований установлено, что в тонком поверхностном слое зубчатых колес из закаленных сталей после термообработки образуются остаточные напряжения сжатия, достигающие $850\text{--}900 \pm 10$ МПа. На глубине более 0,08 мм они уменьшаются до 150 ± 10 МПа.

После шлифования в тонком поверхностном слое (1–5 мкм) возникают значительные напряжения сжатия. При обработке кругами из электрокорунда они достигают 300 ± 10 МПа, а в случае применения кругов КНБ – 1000 ± 10 МПа. При шлифовании без охлаждения остаточные напряжения уменьшаются до 20 % и составляют для электрокорундовых кругов 250 ± 10 МПа, а для кругов из КНБ на органических связках – 800 ± 10 МПа. Снижение остаточных напряжений сжатия в случае шлифования зубчатых колес без охлаждения объясняется повышенным тепловым потоком, способствующим образованию

растягивающих остаточных напряжений и тем самым уменьшающих долю остаточных напряжений сжатия. Однако этот метод определения остаточных напряжений на такой глубине не позволяет получить достоверные результаты измерений.

Установлено, что на глубине 5–8 мкм сжимающие остаточные напряжения переходят в растягивающие и на глубине 20 мкм они равны $100\text{--}400\pm 10$ МПа. Глубина распространения растягивающих остаточных напряжений составляет 70–100 мкм. Характер распределения напряжений при шлифовании указанными кругами одинаков, однако их абсолютные значения различны. Максимальные растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое зубчатых колес возникают в случае обработки инструментом из электрокорунда без охлаждения, а минимальные – кругами из кубического нитрида бора на металлической связке. В последнем случае снижается интенсивность теплового потока, воздействующего на деталь, за счет обильного охлаждения и отвода части тепла в связку круга. Следует отметить, что при шлифовании кругами из кубического нитрида бора на органической связке растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое на 10–15 % выше, чем при шлифовании на металлической связке.

В целом можно отметить, что при зубошлифовании кругами из кубического нитрида бора растягивающие остаточные напряжения в 2 раза меньше, чем при обработке кругами из электрокорунда.

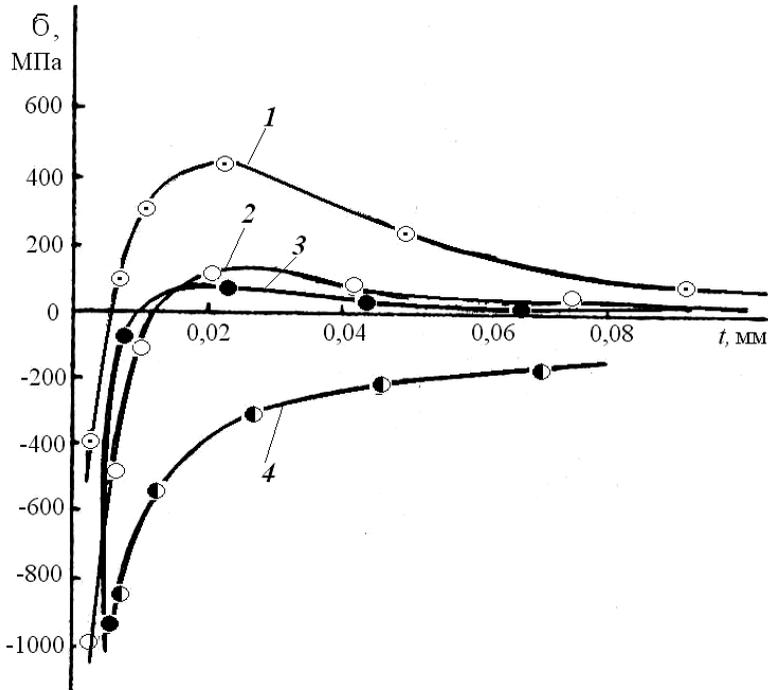


Рис. 2. Остаточные напряжения в поверхностном слое зубчатого колеса: 1 – круг из электрокорунда белого; 2 – круг из КНБ на связке В2-08; 3 – круг из КНБ на связке М2-09; 4 – до шлифования

При зубошлифовании на финишных режимах, при $t = 0,01$ мм кругами из кубического нитрида бора формируются остаточные напряжения сжатия величиной до 200 ± 10 МПа.

Выводы:

1. На всех исследуемых режимах обработки характерно увеличение шероховатости поверхности при уменьшении времени обката зубчатого колеса. Шероховатость обработанной поверхности после шлифования кругами из электрокорунда на 20% ниже по сравнению со шлифованием кругами из КНБ.

2. Установлено, что при финишном шлифовании ($t = 0,01$ мм) кругами из КНБ с охлаждением формируется поверхностный слой зубьев с микроструктурой, не отличающейся от структуры глубинных слоев металла, а черновое шлифование глубиной резания более $t = 0,05$ мм нецелесообразно, ввиду

образования дефектного слоя (около 200 мкм), не удаляемого на последующих финишных операциях обработки.

3. После шлифования в тонком поверхностном слое (1–5 мкм) зуба формируются значительные напряжения сжатия, которые на глубине 5–8 мкм переходят в растягивающие и составляют на глубине 20 мкм $100\text{--}400\pm 10$ МПа.

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. Мишнаевский, А.А. Сагарда, В.М. Емельянов и др. // Синтетические алмазы. – 1970. – № 5. – С. 40–42.
3. Рябченко С.В. Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ / С.В. Рябченко // Сверхтвердые материалы. – 2014. – № 6. – С. 81–89.
4. Сильвестров Б.Н. Зубошлифовальные работы / Б.Н. Сильвестров. – М. : Высшая школа, 1985. – 272 с.
5. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых передач / Б.А. Тайц, Н.Н. Марков. – Л. : Машиностроение, 1978. – 136 с.
6. Эльбор в машиностроении / под ред. В.С. Лысанова. – Л. : Машиностроение, 1978. – 280 с.
7. Качество изготовления зубчатых колес / А.В. Якимов, Л.П. Смирнов, Ю.А. Бояршинов и др. – М. : Машиностроение, 1979. – 191 с.

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

Научные интересы:

- шлифование зубчатых колес;
- алмазно-абразивная обработка

Тел.: +38(044)430–35–29.

E-mail: s.riabchenko@yandex.ru

ФЕДОРЕНКО Виктор Тимофеевич – ведущий инженер Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- шлифование зубчатых колес;

– алмазно-абразивная обработка.

Тел.: +38(044)430–35–29.

СИЛЬЧЕНКО Ярослав Леонидович – ведущий инженер Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

– шлифование зубчатых колес;

– алмазно-абразивная обработка.

Тел.: +38(044)430–35–29.

ПОЛОНСКИЙ Леонид Григорьевич – профессор Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

– механическая обработка конструкционных материалов.

Тел.: (0412)22–69–19.

E-mail: gogol2010@rambler.ru.

ЯНОВСКИЙ Валерий Анатольевич – доцент Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

– механическая обработка конструкционных материалов.

Тел.: (0412)22–69–19.

E-mail: gogol2010@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 10.06.2015