

УДК 621.923

С. В. Рябченко (г. Киев)
s.riabchenko@yandex.ru

Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ

Рассмотрены вопросы повышения эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес 3–4 степени точности при использовании инструмента из сверхтвердых материалов. Изучена работоспособность тарельчатых шлифовальных кругов на различных связках и даны рекомендации по их применению при зубошлифовании.

Ключевые слова: зубошлифование, сверхтвердые материалы, зубчатые колеса, тарельчатый круг, износ кругов.

Зубошлифование является одним из методов финишной обработки закаленных зубчатых колес. Шлифование высокоточных зубчатых колес производится по методу обката на зубошлифовальных станках мод. МААГ, производящих обработку профиля зуба двумя абразивными кругами. Шлифовальные круги могут занимать различные положения относительно обрабатываемого колеса – 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 $Ra = 1,0\text{--}0,2$ мкм [1].

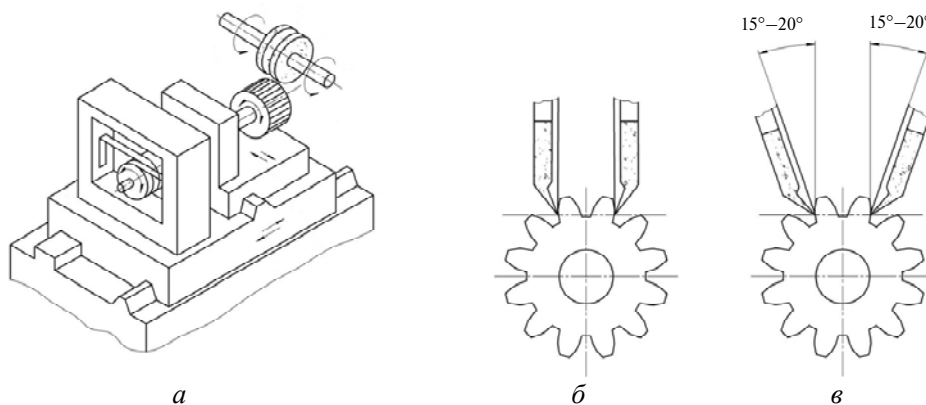


Рис. 1. Схема шлифования зубчатых колес непрерывной обкаткой двумя тарельчатыми кругами (а) и расположение шлифовальных кругов относительно обрабатываемого колеса под углом 0 (б) и $15^\circ\text{--}20^\circ$ (в).

Одним из способов повышения производительности и качества обработки зубчатых колес является применение для зубошлифования кругов из сверхтвердых материалов (СТМ), 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 по-

© С. В. РЯБЧЕНКО, 2014

верхности зуба и возможность получения зубчатых колес 3–4-ой 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.

Целью работы было повышение производительности шлифования высокоточных зубчатых колес тарельчатыми кругами из КНБ при сохранении качественных и точностных показателей зубчатых колес, исследование износа кругов и его влияние на точность обработки.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования процесса шлифования зубчатых колес проводили на специальном стенде, созданном на базе зубошлифовального станка мод. 5891 [5]. Станок был модернизирован для шлифования зубчатых колес с охлаждением и правкой кругов электроэрозионным методом. Зубошлифовальный станок был настроен на 0-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 применяли тарельчатые круги типа 12A2-20° из КНБ диаметром 225 мм на органической (B2-08), керамической (C10) и металлической (M2-09) связках. Шлифовали зубчатые колеса (модуль $m = 6$ мм, число зубьев $z = 21$ зуб, ширина венца $B = 20$ мм) из стали ХВГ (62 HRC).

Оценку работоспособности тарельчатых кругов проводили по следующим показателям: мощности шлифования N , шероховатости обработанной поверхности Ra , точности эвольвентного профиля зуба f_f и износу круга (h – по торцу и l – по диаметру).

Исследования процесса зубошлифования высокоточных колес начинали с построения теоретико-экспериментальной модели процесса обработки. Экспериментально была определена фактическая площадь контакта тарельчатого круга с зубом. Ранее контурную площадь представляли как сегмент с максимальной толщиной в центре, размеры которого значительно превосходят реальную площадь контакта. Экспериментальные исследования контактной зоны показали, что тарельчатый круг при 0-градусном методе шлифования оставляет след на зубчатом колесе, который в аксиальном сечении представляет собой несимметричный кольцевой сектор (ABC), а участок, формирующий эвольвентный профиль зуба, располагается на периферии сектора (точка C) в направлении подачи (рис. 2 и 3).

Для построения модели износа тарельчатого круга рассмотрена модель шлифовального круга, сформированного из большого числа абразивных слоев толщиной ΔY каждый. При зубошлифовании в резании участвуют i слоев алмазоносной части круга, при этом $t = i\Delta Y$. Каждый из i слоев в первый момент времени работает в равных условиях и напоминает шлифовальный круг прямого профиля с размерами $D_{кр}\Delta Y$ работающий методом врезания. При этом условия работы самого крайнего ($i = 1$) слоя, формирующего окончательно эвольвентную поверхность зуба, отличается от работы всех остальных

слоев – этот слой работает как периферией, так и торцом. Поэтому возникающие на его поверхности силы и температуры приводят к более быстрому износу в направлении движения обката (рис. 4).

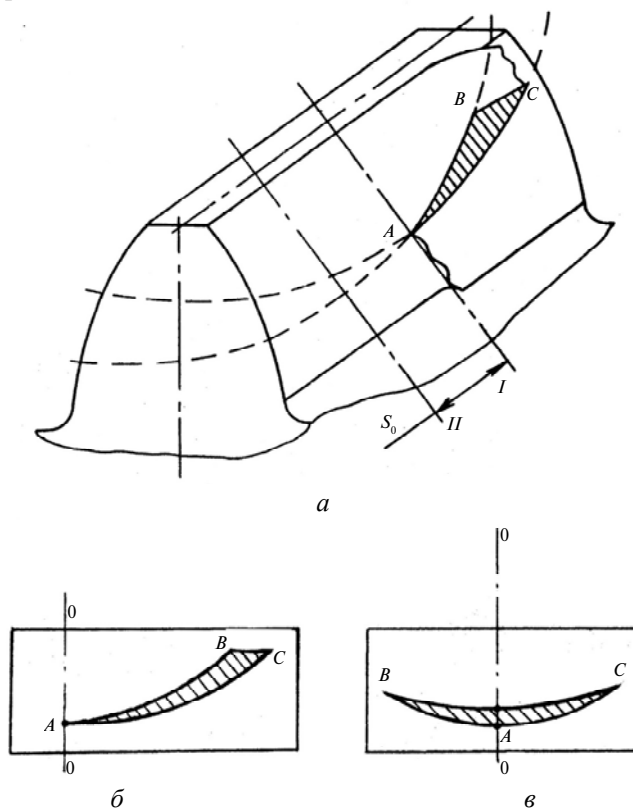


Рис. 2. Контурная площадь контакта шлифовального круга и эвольвентного профиля зуба на станках мод. МААГ (*a*, *б*) и 5891 (*в*): *a* – схема расположения контакта; *б*, *в* – контур контакта.

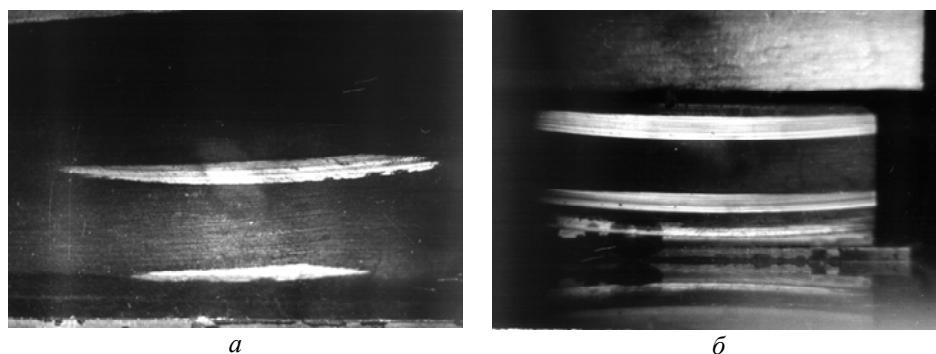


Рис. 3. Фотоснимки участка контакта круга и эвольвентного профиля зуба при шлифовании на станках мод. МААГ (*a*) и 5891 (*б*).

Все множество значений X_n ($1 \leq n \leq i$) представляет собой убывающую арифметическую прогрессию: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{i-1}, X_i$ с разностью прогрессии ΔX , n -й член которой определяется как

$$X_n = X_1 - (n - 1)\Delta X.$$

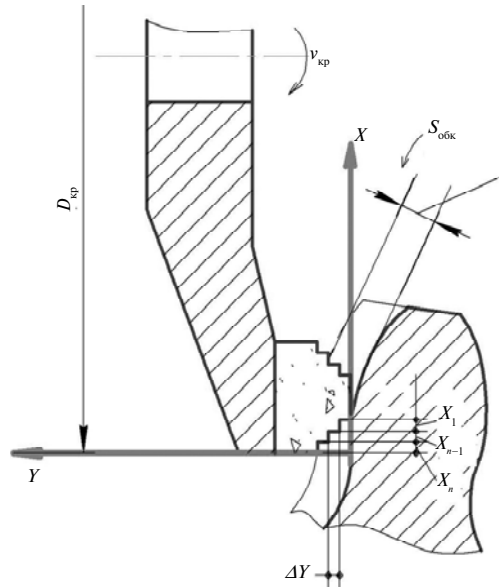


Рис. 4. Модель износа тарельчатого круга.

Если ордината n -слоя – Y_n , а толщина каждого слоя – ΔY , то количество слоев $n = Y_n/\Delta Y$. Следовательно,

$$X_n = X_1 - \left(\frac{Y_n}{\Delta Y} - 1 \right) \Delta X .$$

Для определения линейного износа самого крайнего слоя X_i , считаем, что рассматриваемый круг работает по схеме врезного шлифования и относительный расход абразива определяем из выражения

$$q = \frac{m_{\text{алм}}}{m_{\text{м}}} = \frac{Q_{\text{алм}} \rho_{\text{алм}} K}{Q_{\text{м}} \rho_{\text{м}}},$$

где $m_{\text{алм}}$, $Q_{\text{алм}}$, $\rho_{\text{алм}}$ и $m_{\text{м}}$, $Q_{\text{м}}$, $\rho_{\text{м}}$ – соответственно масса, объем и плотность алмазного слоя и сошлифованного материала; K – концентрация алмазов; объем алмазного слоя $Q_{\text{алм}} = \pi D_{\text{кр}} X_1 \Delta Y$; объем сошлифованного материала $Q_{\text{м}} = ab \Delta Y$, где a , b – глубина и ширина внедрения круга соответственно. Произведение a и b является параметром контурной площади контакта тарельчатого круга с зубом. При $\Delta X, \Delta Y \rightarrow 0$ получим

$$X = \frac{qab\rho_{\text{м}}}{\pi D_{\text{кр}} \rho_{\text{алм}} K} - \left(\frac{Y}{\Delta Y} - 1 \right) dX .$$

После интегрирования данного уравнения определим

$$Y = C \frac{\pi D_{\text{кр}} \rho_{\text{алм}} K}{X - qab\rho_{\text{м}}},$$

где C – константа интегрирования.

Обозначив

$$\alpha = \frac{1}{C \pi D_{\text{кр}} \rho_{\text{алм}} K}; \quad \beta = \frac{qab\rho_{\text{м}}}{C \pi D_{\text{кр}} \rho_{\text{алм}} K},$$

получим

$$Y = \frac{1}{\alpha X - \beta}.$$

Анализ результата математических преобразований показывает, что макропрофиль радиального сечения алмазоносного слоя описывается дробно-линейной функцией, которая аппроксимируется гиперболой, а участок в радиальном сечении шлифовального круга, формирующий эвольвентный профиль, располагается на вершине режущей части, имеющей размеры, соизмеримые с размером режущего зерна. Аналогичное решение правомерно для условий обратного хода тарельчатого шлифовального круга от ножки зуба к его головке.

Износ режущей части тарельчатого круга из-за его небольших размеров можно рассматривать как износ отдельных абразивных зерен. Износ круга при одновременном действии ряда разрушающих факторов можно свести к определению надежности последовательной системы, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. Если они слабо влияют друг на друга (что имеет место для многих условий шлифования), то элементы системы можно считать не зависящими друг от друга. Такие условия шлифования наблюдаются при зубошлифовании тарельчатыми кругами 0-градусным методом, где небольшой участок круга, фактически абразивное зерно, осуществляет периодическое шлифование как в черновом, так и финишном вариантах. Авторы рассмотрели вероятность разрушения абразивного зерна в круге как важнейшего элемента системы, осуществляющего непосредственный контакт с обрабатываемой поверхностью и сам процесс резания.

Определяли степень влияния разброса действующей P_z и критической P_{zk} нагрузок на вероятность разрушения зерен в кругах при разных режимах шлифования. Установлено качественное различие между вероятностью разрушения при коэффициенте запаса прочности $K_n > 1$, $K_n = 1$ и $K_n < 1$. При $K_n > 1$ меньшие значения вероятности разрушения достигаются при меньших величинах $V_{P_{zk}}$ и V_{P_z} – коэффициентах вариации величин P_{zk} и P_z . (рис. 5). Это означает, что на финишных операциях шлифования для обеспечения меньшей вероятности разрушения зерен в круге целесообразно использовать шлифовальные круги с минимальным, по возможности, разбросом характеристик зерен КНБ (размеров, формы, ориентации, прочности и т. д.).

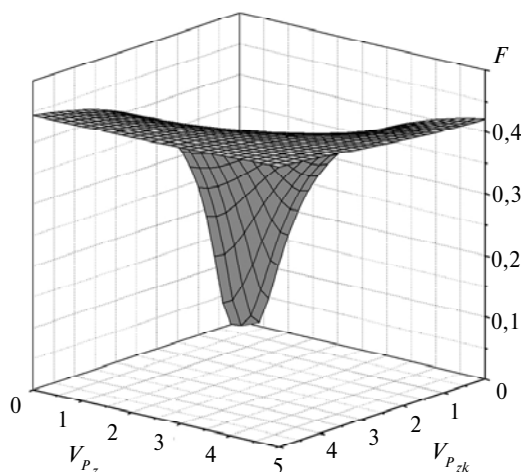


Рис. 5. Вероятность разрушения зерна при $K_n > 1$ (финишное шлифование): $K_n = 2$;

$$F = 0,5 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{(K_n - 1)}{\sqrt{2(V_{P_{zk}}^2 K_n^2 + V_{P_z}^2)}} \right) \right]$$

Для значений K_n , близких к единице, разброс критической и действующей на зерно нагрузок сильно влияет на величину вероятности разрушения лишь в области малых значений коэффициентов $V_{P_{zk}}$ и V_{P_z} . При $K_n = 1$ она вырождается в единственную точку: $V_{P_{zk}} = 0$ и $V_{P_z} = 0$, т. е. это означает, что разброс действующей и критической нагрузок при $K_n = 1$ практически не влияет на вероятность разрушения зерна (рис. 6).

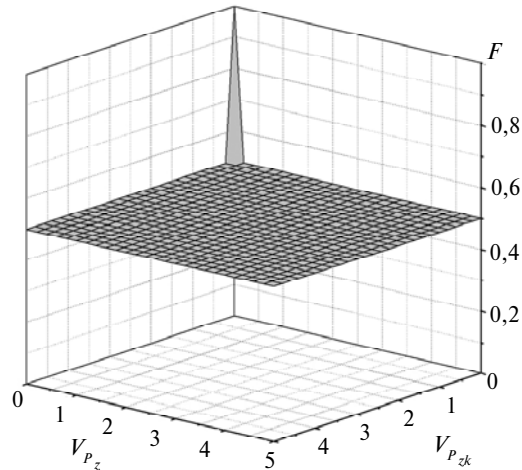


Рис. 6. Вероятность разрушения зерна при $K_n = 1$; $F = 0,5$.

Для режимов шлифования с величиной коэффициента запаса прочности $K_n < 1,0$ (высокопроизводительное шлифование) разброс критической и действующей на зерна нагрузок при больших K_n сильнее влияет на величину вероятности разрушения, чем при меньших K_n (рис. 7). При этом меньшие значения вероятности разрушения зерна достигается при большем разбросе как действующей на зерно нагрузки, так и его прочностных свойств.

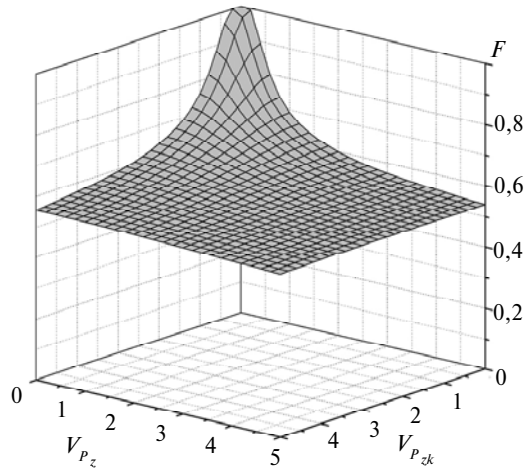


Рис. 7. Вероятность разрушения зерна при $K_n < 1$ (высокопроизводительное шлифование):

$$K_n = 0,5; F = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{(1 - K_n)}{\sqrt{2(V_{P_{zk}}^2 K_n^2 + V_{P_z}^2)}} \right) \right].$$

Дальнейшие исследования процесса шлифования тарельчатыми кругами из КНБ подтвердили ранее предложенную теоретико-экспериментальную модель износа круга, возможности повышения производительности и качество обработки поверхности зубьев.

Исследование износа тарельчатых кругов и его влияние на точность эвольвентного профиля зубчатого колеса производили при черновом ($t = 0,05$ мм) и чистовом ($t = 0,02$ мм) зубошлифовании.

Анализ результатов показал, что мощность шлифования кругами из КНБ на керамической связке при всех режимах на 15–20 % выше, чем на органических связках. Шлифование зубчатых колес кругами из КНБ на керамической связке обеспечивает высокую ($f_f = 4–5$ мкм) точность эвольвентного профиля зуба.

Мощность шлифования кругами из КНБ на металлической связке (рис. 8) на 30–40 % выше, чем на органических связках. Шероховатость поверхности зубьев колеса при всех исследуемых режимах соответствовала $Ra = 0,70–0,75$ мкм. При этом ее большее значение соответствовало меньшей ($\tau = 3$ с) величине времени обката. Шлифование зубчатых колес кругами из КНБ на металлической связке также обеспечивает высокую ($f_f = 4–5$ мкм) точность эвольвентного профиля зуба (рис. 9).

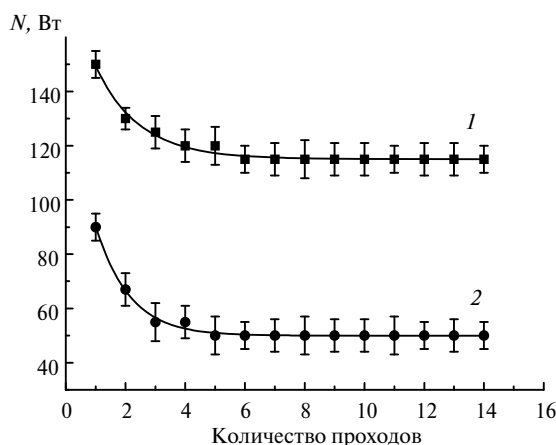


Рис. 8. Зависимость мощности шлифования кругами из КНБ на металлической связке от количества проходов при $t = 0,05$ (1) и $0,02$ (2) мм.

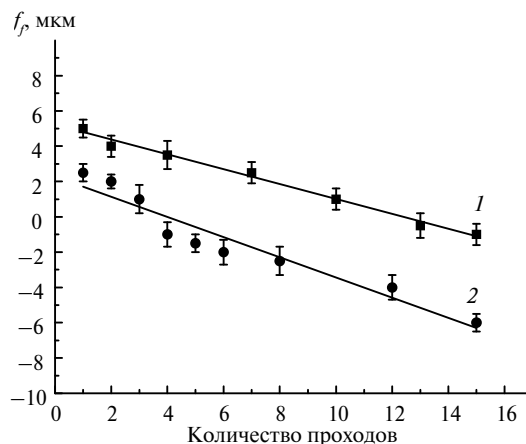


Рис. 9. Зависимость погрешности профиля от количества проходов при шлифовании кругами из КНБ на металлической связке: $t = 0,05$ (1) и $0,02$ (2) мм.

Результаты экспериментов показали, что лимитирующим параметром для обеспечения точности обработки зубчатого колеса является размерный износ тарельчатого круга, который пропорционален количеству обработанных зубьев. Режущая кромка тарельчатого круга представляет собой площадку размером 0,03–0,05 мм, образующую на первом проходе шлифования зубчатого колеса. В течение всего процесса обработки мощность резания практически остается на одном уровне. Не изменяется и фактический сьем материала, находясь в пределах 0,61–0,50. Это обстоятельство говорит о том, что в процессе шлифования зубчатых колес тарельчатый круг из КНБ работает в режиме самозатачивания.

Установлено, что после ускоренного износа круга в течение первого прохода интенсивность износа инструмента снижается и стабилизируется на определенном уровне (рис. 10 и 11). Это характерно как для чернового зубошлифования, так и чистового. В то же время характер изменения погрешности профиля и мощности шлифования говорит о том, что правка круга при чистовой обработке не требуется, тем самым позволяя повысить производительность обработки до 50 %.

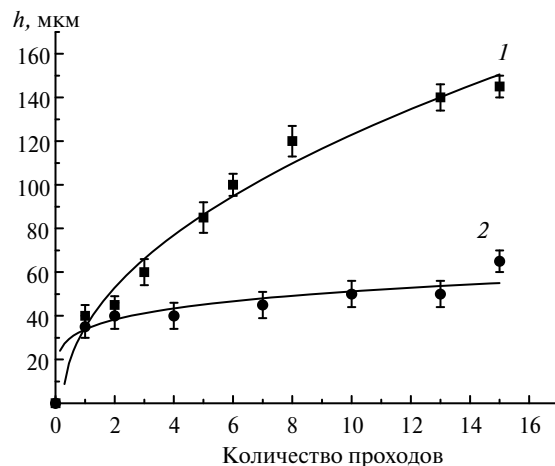


Рис. 10. Зависимость износа круга по торцу от количества проходов при шлифовании кругами из КНБ на металлической связке: $t = 0,05$ (1) и $0,02$ (2) мм.

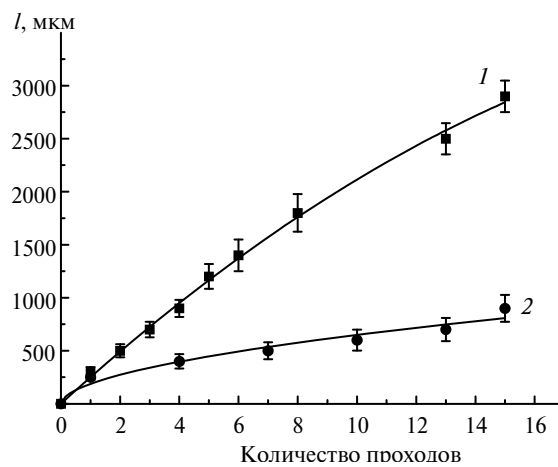


Рис. 11. Зависимость износа круга по диаметру от количества проходов при шлифовании кругами из КНБ на металлической связке: $t = 0,05$ (1) и $0,02$ (2) мм.

ВЫВОДЫ

В результате анализа износа тарельчатого круга из КНБ установлено, что для сокращения периода приработки кругов при зубошлифовании на режущей кромке необходимо предварительно формировать фаску с размером $h = 0,03-0,05$ мм, что соответствует величине “прирабочного” износа инструмента.

Проведенные предварительные исследования процесса зубошлифования показали высокую эффективность обработки зубчатых колес тарельчатыми кругами из КНБ. Эти исследования позволили уточнить конструкции основных узлов базового станка и предложить новую конструкцию специального зубошлифовального станка, работающего тарельчатыми кругами из КНБ и имеющего специальный механизм электроэрозионной правки.

Для шлифования зубчатых колес разработаны тарельчатые шлифовальные круги на металлических связках, техническая документация и оснастка для их изготовления.

Розглянуто питання підвищення ефективності шліфування високоточних зубчастих коліс 3–4 ступеня точності при використанні інструмента з надтвердих матеріалів. Досліджено працездатність тарілоччастих шліфувальних кругів на різних зв'язках і дано рекомендації з їхнього застосування при зубошліфуванні.

Ключові слова: зубошліфування, надтверді матеріали, зубчасті колеса, тарілоччастий круг, знос кругів.

The paper addresses the issues of improving efficiency of superabrasive grinding of high-precision gears with an accuracy grade of 3 to 4. The performance of dish wheels in various bonds has been studied, and recommendations regarding the use of these wheels in gear grinding are provided.

Keywords: gear grinding, superabrasive materials, gears, dish wheel, wheel wear.

1. Гулида Э. Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес. – Львов: Вища школа, 1977. – 168 с.
2. Мишинаевский Л. Л., Сагарда А. А., Емельянов В. М. и др. Высокопроизводительное зубошлифование кругами из кубического нитрида бора // Синт. алмазы. – 1970. – Вып. 5. – С. 40–42.
3. Эльбор в машиностроении / Под ред. В. С. Лысанова. – Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.
4. Мишинаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов. – К.: Наук. думка, 1982. – 192 с.
5. Рябченко С. В. Разработка технологии шлифования зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць (Серія Г: Процеси механічної обробки, верстати та інструменти). – К.: НАН України. ІНМ ім. В. М. Бакуля, 2006. – С. 161–168.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 30.07.14