

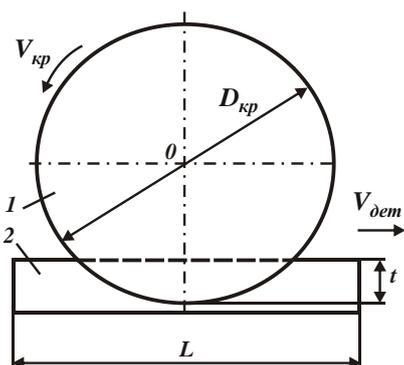
### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ ПО МЕТОДУ ПРОФИЛЬНОГО КОПИРОВАНИЯ

В последние годы в связи с созданием и широким применением эффективных высокопористых абразивных кругов появилась тенденция перехода от зубошлифования по методу обкатывания к прогрессивной технологии зубошлифования по методу профильного копирования, реализующего схему глубинного шлифования [1]. Вместе с тем, как показывает практика, высокопористые абразивные круги не обеспечивают необходимую шероховатость поверхности, а это требует снижения режимов шлифования и производительности обработки, что ограничивает возможности эффективного применения технологии зубошлифования по методу профильного копирования.

Для решения задачи эффективного применения зубошлифования по методу профильного копирования важно знать оптимальные условия обработки, обеспечивающие требуемую шероховатость поверхности в условиях глубинного шлифования. Как известно, вопросам теоретического определения шероховатости поверхности при абразивной обработке, в особенности при шлифовании, в научно-технической литературе уделено большое внимание [2]. Создание теоретико-вероятностного подхода к расчету параметров шероховатости поверхности при шлифовании [3] открыло принципиально новые возможности анализа закономерностей формирования поверхности и определения условий интенсификации процесса шлифования с учетом требований по шероховатости обработанной поверхности. Однако, более глубокому исследованию закономерностей формирования шероховатости поверхности при шлифовании должен предшествовать упрощенный анализ, основанный на геометрическом представлении шероховатого слоя обработанной поверхности без учета вероятностного характера участия абразивных зерен в резании [4]. Это позволит более полно и в системном виде раскрыть сложные закономерности образования шероховатости поверхности при шлифовании.

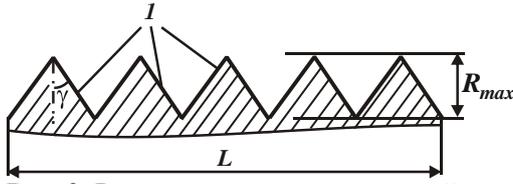
Цель работы – обоснование оптимальных условий зубошлифования по методу профильного копирования с учетом ограничений по шероховатости поверхности.

Произведем упрощенный расчет шероховатости поверхности, формируемой в процессе зубошлифования по методу профильного копирования (рис. 1). Рассмотрим



**Рис. 1.** Расчетная схема шероховатости на боковой поверхности зуба колеса при шлифовании торцом круга: 1 – круг; 2 – зуб колеса.

условия образования шероховатости на боковой поверхности зуба зубчатого колеса за один проход круга. Будем считать, что формирование шероховатости поверхности происходит в результате взаимодействия абразивных зерен, расположенных на торцевой поверхности круга, с боковой поверхностью зуба колеса в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 1. Предположим, что за время одного прохода круга в резании приняло участие  $z$  зерен круга, которые равномерно оставили свои следы на условной горизонтальной плоскости, расположенной перпендикулярно торцевой поверхности абразивного круга. Тогда упрощенно шероховатый слой обработанной поверхности можно представить в виде, показанном на рис. 2, с учетом образования регулярной шероховатости (с одинаковой высотой микронеровностей  $R_{max}$  и с одинаковым шагом микронеровностей). Параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  установим из условия:



**Рис. 2.** Расчетная схема максимальной высоты микронеровности на обработанной поверхности  $R_{max}$ : 1 – микронеровности.

вдоль обрабатываемого зуба  $\tau$  круг совершил  $i$  вращений:

$$i = \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (2)$$

где  $\tau_0 = \frac{\pi \cdot D_{кр}}{V_{кр}}$  – время одного вращения круга, с;

$D_{кр}$  – диаметр круга, м;

$V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

Время  $\tau$  может быть определено по зависимости:

$$\tau = \frac{L}{V_{дем}}, \quad (3)$$

где  $V_{дем}$  – скорость перемещения детали (скорость перемещения круга вдоль обрабатываемого зуба колеса), м/с.

Тогда

$$i = \frac{L}{\pi \cdot D_{кр}} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дем}}. \quad (4)$$

Количество абразивных зерен, расположенных на торцовой рабочей поверхности круга и участвующих в процессе резания, определяется

$$z_0 = k \cdot \frac{R_{max}}{b} \cdot \pi \cdot D_{кр} \cdot t, \quad (5)$$

где  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;

$b$  – максимальная высота выступания абразивных зерен над уровнем связки круга, м;

$t$  – расстояние от условной горизонтальной плоскости зуба (в которой рассматривается формирование шероховатости поверхности) до периферии шлифовального круга (рис. 1).

Тогда суммарное количество абразивных зерен  $z$ , участвующих в формировании шероховатости поверхности, выразится

$$z = i \cdot z_0 = k \cdot \frac{R_{max}}{b} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дем}} \cdot t \cdot L. \quad (6)$$

Зная величину  $z$ , из условия (1) определим параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$ :

$$R_{max} = \sqrt{\frac{b \cdot V_{дем}}{2 \cdot tg \gamma \cdot k \cdot t \cdot V_{кр}}}. \quad (7)$$

Как следует из полученной зависимости (7), параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  в одинаковой степени зависит от всех входящих параметров. Уменьшить

$$2 \cdot R_{max} \cdot tg \gamma \cdot z = L, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – угол наклона микронеровностей;

$L$  – длина обрабатываемого зуба колеса, м.

Количество абразивных зерен  $z$ , участвующих в формировании шероховатости поверхности, определим следующим образом. За время одного продольного хода круга

$R_{max}$  можно уменьшением параметров  $b$ ,  $V_{дет}$  и увеличением  $\gamma$ ,  $k$ ,  $t$  и  $V_{кр}$ . Очевидно, наименьшая шероховатость поверхности будет достигаться в условной горизонтальной плоскости, проходящей через вершину зуба, поскольку в этом случае параметр  $t$  принимает наибольшее значение. В нижней точке обрабатываемой впадины зуба параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  будет принимать наибольшее значение, т.к. параметр  $t$  будет минимальным. В связи с этим, для уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  для небольших значений  $t$  необходимо уменьшать параметры  $b$ ,  $V_{дет}$  и увеличивать  $\gamma$ ,  $k$  и  $V_{кр}$ .

По физической сути между параметрами  $k$  и  $b$  должна существовать аналитическая связь. Для ее установления воспользуемся методикой расчета, предложенной в работе [5]. Параметр  $b$  представим в виде

$$b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}, \quad (8)$$

где  $(1 - \varepsilon)$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень выступления абразивного зерна над уровнем связки круга;  
 $\bar{X}$  – зернистость круга, м.

Применительно к алмазному кругу параметр  $k$  может быть аналитически описан зависимостью [6]:

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}, \quad (9)$$

где  $m$  – объемная концентрация круга.

Параметр  $m$ , по сути, является безразмерной величиной. Например, для алмазного круга 100 %-ной концентрации  $m = 100$ . В этом случае объем зерен составляет 25 % от объема алмазного круга [7], остальные 75% составляет связка. Как известно, содержание зерна в абразивном круге по объему больше, чем в алмазном круге. Так, 25 %-му содержанию зерен в объеме круга соответствует высокопористая структура №18 абразивного круга. Все остальные структуры абразивного круга характеризуются большим содержанием зерен в круге. Например, структура №1 предполагает содержание в круге по объему 60% зерен.

С учетом зависимостей (8) и (9) отношение  $b/k$ , входящее в зависимость (7), выразится

$$\frac{b}{k} = \frac{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3}{m}. \quad (10)$$

Подставляя зависимость (10) в зависимость (7), имеем

$$R_{max} = \sqrt{\frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{tg \gamma \cdot m \cdot t \cdot V_{кр}}}. \quad (11)$$

Из преобразованной зависимости (11) следует, что наибольшее влияние на параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  оказывает зернистость круга  $\bar{X}$ . Поэтому добиться снижения шероховатости поверхности можно в первую очередь за счет уменьшения зернистости круга  $\bar{X}$ . Однако, как известно, уменьшение зернистости круга  $\bar{X}$  приводит к снижению режущей способности круга. В этом плане теряется преимущество от применения высокопористых абразивных кругов, обладающих высокой режущей способностью и позволяющих существенно повысить производительность обработки. В связи с этим, важно обеспечить такие условия обработки, при которых бы одновременно достигались высокие показатели шероховатости и производительности обработки. Исходя из зависимости (11), ими являются увеличение скорости круга  $V_{кр}$  и уменьшение скорости детали  $V_{дет}$ . Поскольку увеличение скорости круга  $V_{кр}$  предполагает увеличение температуры шлифования и снижение ка-

чества обработки, то единственным возможным путем уменьшения шероховатости поверхности в этом случае может быть уменьшение скорости детали  $V_{дет}$  или (что фактически равнозначно) увеличение количества проходов круга вдоль обрабатываемого зуба колеса (по схеме выхаживания).

Необходимо отметить, что увеличение количества проходов круга также предполагает и обеспечение требуемой точности обработки. Поэтому выбор оптимальной скорости детали  $V_{дет}$  следует производить в каждом конкретном случае в зависимости от требований по шероховатости и точности обрабатываемой поверхности.

Произведем расчет параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  в соответствии с зависимостью (11) для следующих исходных данных:  $\gamma = 45^0$ ;  $m = 100$ ;  $t = 10$  мм;  $V_{кр} = 40$  м/с;  $V_{дет} = 0,3 \dots 3$  м/мин;  $\bar{X} = 0,1 \dots 0,5$  мм. В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (11) значения параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  для различных значений зернистости круга  $\bar{X}$  и скорости детали  $V_{дет}$ .

**Таблица 1**  
**Расчетные значения параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  (в мкм)**

$V_{дет}$ , м/мин $\parallel \bar{X}$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,114	0,322	0,592	0,912	1,275
0,8	0,186	0,526	0,97	1,49	2,08
3	0,36	1,018	1,872	2,883	4,03

Учитывая то, что между параметрами шероховатости поверхности  $R_{max}$  и  $R_a$  существует связь [2]:  $R_{max}/R_a \approx 5$ , в табл. 2 и на рис. 3 приведены расчетные значения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  для различных значений зернистости круга  $\bar{X}$  и скорости детали  $V_{дет}$ .

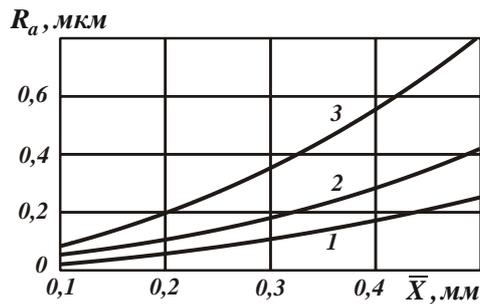
**Таблица 2**  
**Расчетные значения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  (в мкм)**

$V_{дет}$ , м/мин $\parallel \bar{X}$ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,023	0,064	0,118	0,182	0,255
0,8	0,037	0,105	0,194	0,298	0,416
3	0,072	0,204	0,374	0,577	0,806

Как видно, с увеличением зернистости круга  $\bar{X}$  в пределах 0,1...0,5 мм при скорости детали  $V_{дет} = 0,3$  м/мин (т.е. для условий глубинного шлифования) параметр шероховатости поверхности  $R_a$  изменяется в пределах 0,023...0,255 мкм, а при скорости детали  $V_{дет} = 3$  м/мин – в пределах 0,072...0,806 мкм.

Поскольку высокопроизводительное глубинное шлифование предполагает применение крупнозернистых высокопористых абразивных кругов, то обеспечение параметра шероховатости поверхности  $R_a = 0,806$  мкм при зернистости круга  $\bar{X} = 0,5$  мм вполне соответствует требованиям по шероховатости обработки на операции зубошлифования по методу профильного копирования.

Таким образом, расчетами установлено, что применение высокопористых абразивных кругов на операциях зубошлифования по методу профильного копирования позволяет добиться требуемой шероховатости поверхности. Как известно, применение высокопористых абразивных кругов также позволяет существенно уменьшить температуру шлифования и обеспечить высокие требования по точности обработки. Следовательно, осуществляя зубошлифование по методу профильного копирования,



**Рис. 3.** Зависимость параметра шероховатости поверхности  $R_a$  от зернистости круга  $\bar{X}$ : 1 –  $V_{дем} = 0,3$  м/мин; 2 –  $V_{дем} = 0,8$  м/мин; 3 –  $V_{дем} = 3$  м/мин

можно одновременно обеспечить требования по качеству и точности обрабатываемых поверхностей, включая состояние поверхностного слоя детали (исключаются температурные дефекты на обрабатываемых поверхностях), параметры шероховатости и точности обработки. При этом также достигается увеличение производительности обработки по сравнению с зубошлифованием по методу обкатывания, когда реализуется схема многопроходного шлифования.

### ВЫВОДЫ

1. Получена аналитическая зависимость для определения шероховатости поверхности при зубошлифовании по методу профильного копирования и установлены условия ее уменьшения. Показано определяющее влияние на шероховатость поверхности зернистости абразивного круга.

2. Произведен расчет шероховатости поверхности для условий глубинного шлифования высокопористым абразивным кругом и определены значения оптимальной зернистости круга. Показано, что наряду с обеспечением требуемой шероховатости поверхности, применение высокопористых кругов также позволяет повысить качество и точность обработки.

### Перечень ссылок

1. Кацук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кацук, А.Б. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
2. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы изд-ва "Наука", 1975. – 344 с.
3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
4. Шкурупій В.Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В.Г. Шкурупій. – Одеса, 2006. – 21 с.
5. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
6. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф.В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с.
7. Кацук В.А. Справочник заточника / В.А. Кацук, А.Д. Мелехин, Б.П. Бармин. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.

Рецензент д. т. н., профессор Суглобов В. В.

Статья поступила 10.09.2013 г.