

УДК 621.923

**П.Г. МАТЮХА** (докт. техн. наук, проф.)**В.В. ГАБИТОВ** (аспирант, мл. научн. сотр., gabitov-v@ya.ru)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

**ВЛИЯНИЕ ВИДА ШЛИФОВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ  
ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

В работе проанализировано влияние вида шлифования на шероховатость обработанной поверхности при прочих одинаковых условиях обработки. Установлено, что с позиции формирования идентичных параметров шероховатости внутреннее врезное шлифование позволяет вести обработку с большей производительностью по сравнению с круглым наружным и плоским врезным шлифованием.

**Ключевые слова:** Вид шлифования, параметр шероховатости, высота неровностей, единичный срез

**Введение**

В условиях рыночных отношений обеспечение требуемого качества выпускаемых изделий является одним из условий конкурентоспособности продукции. При механической обработке, одним из критериев оценки качества деталей является обеспечение заданных параметров шероховатости обработанной поверхности.

В основу существующих методик расчета параметров шероховатости положен геометрический фактор, предполагающий образование неровностей на обработанной поверхности в процессе резания, форма которых копирует размеры и форму режущих зерен [1, 2]. Таким образом, формирование шероховатости обрабатываемой поверхности определяется кинематикой шлифования и геометрией рабочей поверхности круга (РПК). Известные способы расчета высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности [3, 4, 5] не учитывают разновысотного расположения зерен в процессе обработки, а используют ее лишь при определении количества активных зерен. В действительности, формирование шероховатости происходит разновысотно расположенными вершинами зерен, а глубина среза и их общее количество, участвующее в формировании параметров шероховатости, определяется не только разновысотностью, но и условиями контактирования зерна с обрабатываемой поверхностью, что учтено в методике расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности при плоском врезном шлифовании [6]. Наличие этой методики позволяет выполнить анализ влияния вида шлифования на параметр шероховатости обработанной поверхности, сведения о чем в литературе отсутствуют.

Цель работы: исследование влияния вида шлифования на шероховатость обработанной поверхности.

**Основное содержание работы**

Перед выполнением исследований рассмотрим методику расчета высоты неровностей профиля шлифованной поверхности при круглом внутреннем шлифовании (рис. 1). При этом виде шлифования круг радиусом  $R_k$  вращается со скоростью  $V_k$ , м/с, деталь вращается в противоположном направлении со скоростью  $V_d$ , м/мин, а формирование неровностей на обработанной поверхности осуществляется преимущественно сегментообразными, неперекрывающимися в поперечном

направлении срезами.

Расчет высоты неровностей обработанной поверхности выполним при следующих допущениях:

- обрабатываемая поверхность в начальный период обработки представляет собой идеальную цилиндрическую поверхность, шероховатость на которой отсутствует;
- в пределах рассматриваемого интервала расчета режущие зерна на РПК считаются равновысокими, т.е. расположены на одной линии;
- упругие деформации системы СПИД и пластические искажения поперечного профиля срезов не учитываются.

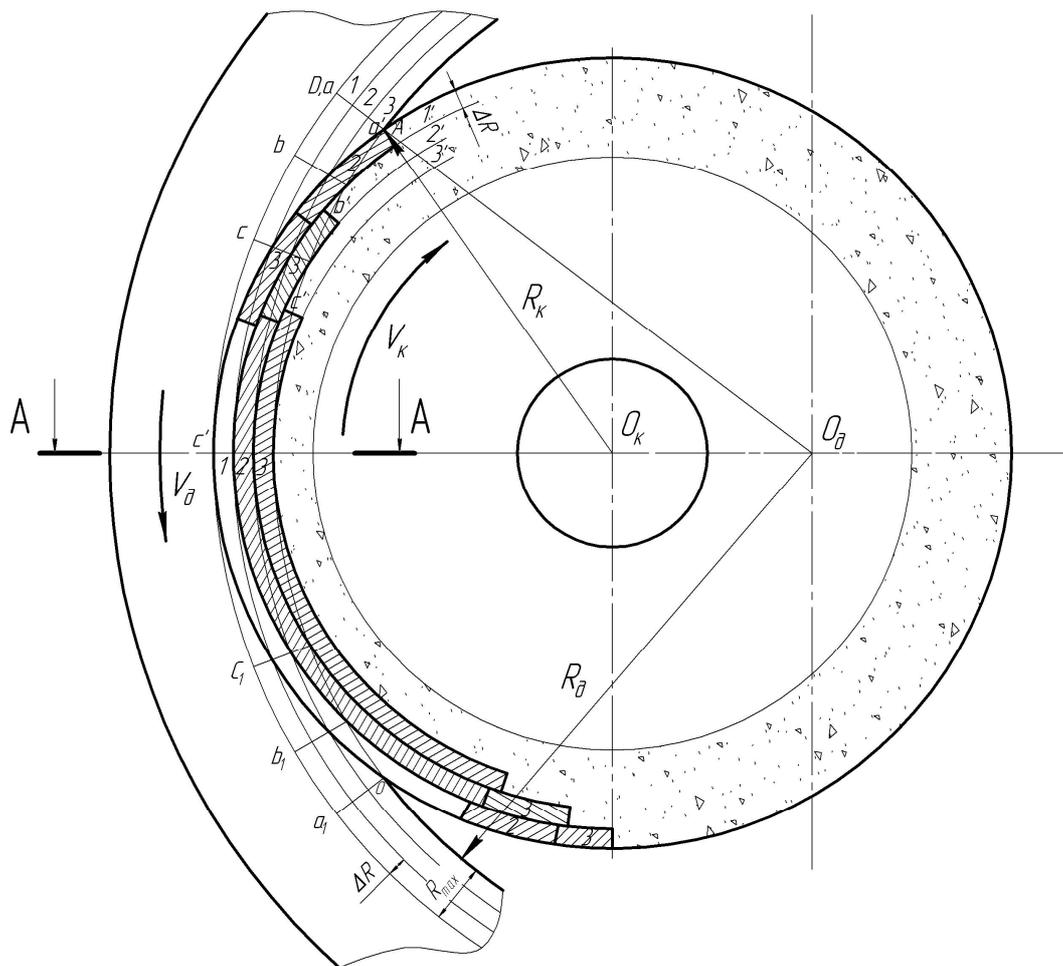


Рис. 1. Схема формирования неровностей на обработанной поверхности участками РПК при круглом внутреннем шлифовании

Рассмотрим порядок формирования поперечного профиля шлифованной поверхности заготовки (см. рис. 1), как совокупности следов отдельных зерен, расположенных на участке РПК и оставленных в рассматриваемом поперечном сечении. На рис. 2 показано сечение А-А обработанной поверхности, сформированное в соответствии с принятыми допущениями. Учитывая, что неровности располагаются на одной линии  $R_{max}$  примем равным  $R_z$ .

Наибольшую высоту неровностей профиля  $R_{max}$  разобьем на ряд малых интервалов  $\Delta R$ , величина которых определяется из условия попадания в единичный

интервал минимум одного зерна.

Рабочую поверхность круга, участвующую в формировании параметров шероховатости в поперечном сечении детали, также разобьем на ряд слоев толщиной  $\Delta R$  и определим участки на поверхности круга, зерна которых оставят следы в соответствующих интервалах сечения детали.

В общем случае в сечении  $AD$  (см. рис. 1) оставят свои следы зерна, вершины которых расположены в объеме шлифовального круга  $l_\phi \cdot R_{\max} \cdot l_{\delta a3} \cdot k$ :

где  $l_{\delta a3}$  – базовая длина профиля сечения обработанной поверхности, по которой рассчитывается параметр шероховатости, мм;

$l_\phi$  – длина дуги контакта круга с деталью, на которой расположены зерна, формирующие профиль неровностей, мм;

$k$  – коэффициент, учитывающий, что не все зерна на РПК более глубоких слоев, оставят следы в рассматриваемом сечении.

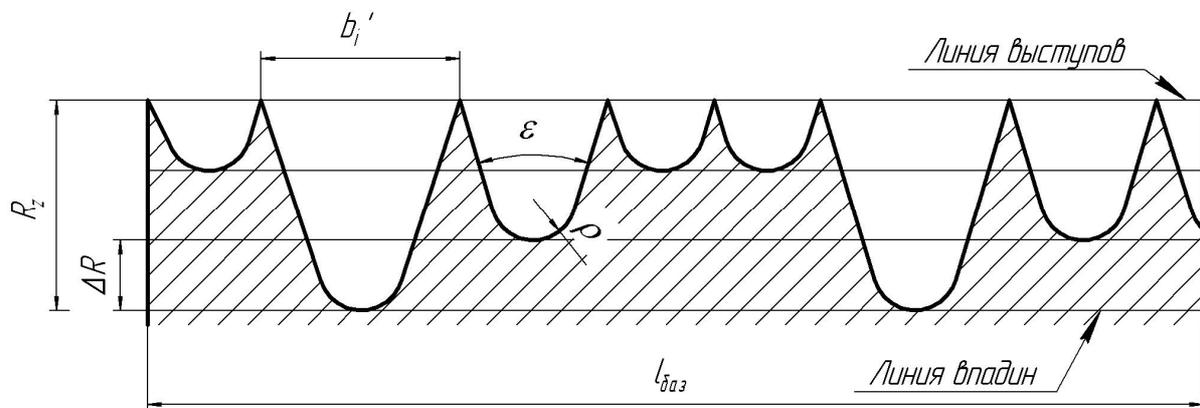


Рис. 2. Шероховатость обработанной поверхности, сформированная единичными срезами

Образование царапин на профиле  $AD$  начинается с момента его расположения в точке  $a$ . При перемещении сечения  $AD$  из точки  $a$  в точку  $b$  в результате вращения заготовки в работу вступят наиболее выступающие зерна, вершины которых расположены в слое 1' шлифовального круга. Зерна, расположенные в объеме  $a'b' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ , оставят следы в интервале 3 сечения  $AD$ , ширина срезов которых будет равна  $b'(\Delta R)$ . При дальнейшем перемещении из точки  $b$  в точку  $c$  в работу вступят зерна, расположенные в слое 1' объемом  $b'c' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ , и оставят следы в интервале 2 сечения шириной  $b'(2\Delta R)$ . Также в работу вступят вершины зерен, расположенные в более глубоком слое 2' круга объемом  $b'c'' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ . Эти зерна оставят следы в интервале 3 детали шириной  $b'(\Delta R)$ .

При перемещении сечения  $AD$  из точки  $c$  к оси круга в работу вступят зерна слоя 1' объемом  $c'c'' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ . Они оставят следы в интервале 1 шириной  $b'(3\Delta R)$ . Зерна слоя 2' объемом  $c'c''' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$  оставят следы в интервале 2 шириной  $b'(2\Delta R)$ . В работу также вступят зерна, расположенные в слое 3' объемом  $c'c'''' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ . Они оставят следы в интервале 3 шириной  $b'(\Delta R)$ .

После прохождения сечением  $AD$  линии центра шлифовального круга обработка

интервалов 1, 2, 3 закончится соответственно в точках  $c_1, b_1, a_1$ .

Таким образом, последовательно наращивая глубину шлифования на шаг  $\Delta R$ , будем определять суммарную ширину срезов в интервалах сечения 1, 2, 3 и т.д. Критерием полной обработки поперечного сечения обработанной поверхности будет условие, согласно которому суммарная ширина единичных срезов  $b'_i$ , оставленных отдельными зернами, будет больше или равна базовой длине  $l_{\text{баз}}$ :

$$\sum_{i=1}^{Z_c} b'_i \geq l_{\text{баз}} \cdot 10^3; \quad (1)$$

где  $Z_c$  – количество зерен, участвующих в формировании рельефа;

$b'_i$  – ширина среза единичным зерном в исследуемом  $i$ -м сечении, мкм.

Представим левую часть неравенства (1) как сумму произведений ширины единичных срезов на количество режущих зерен, оставивших свои следы в  $i$ -м сечении для каждого интервала расчета  $i$ , после чего неравенство (1) примет вид:

$$\frac{l_{\text{баз}} \cdot 60 \cdot V_k}{V_{\partial} \cdot S_{\text{зн}}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_{\partial} \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_{\partial} - R_k}} \times \\ \times \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^i (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - 1}) \cdot b'[(N - i - N_1 + 2) \cdot \Delta R] \geq l_{\text{баз}} \cdot 10^3 \quad (2)$$

где  $N$  – номер исследуемого интервала;

$i$  – номера интервалов, входящих в  $N$ ,  $i \in 1, 2, \dots, N$ ;

$N_1$  – участки поверхности круга, обрабатываемые  $i$ -е интервалы,  $N_1 \in 1, 2, \dots, N - i + 1$ ;

$F(i\Delta R)$  – вероятность попадания вершин зерен в  $i$ -й интервал, определяемый с использованием закона Вейбулла;

$S_{\text{зн}}$  – расстояние между зернами на рабочей поверхности круга.

Так как в правой и левой частях уравнения (2) находится базовая длина, то после ее сокращения, а также обозначения выражения:

$$\frac{60 \cdot V_k}{V_{\partial} \cdot S_{\text{зн}}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_{\partial} \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_{\partial} - R_k}} = A,$$

уравнение (2) примет вид:

$$A \cdot \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^i (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - 1}) \cdot b'[(N - i - N_1 + 2) \cdot \Delta R] \geq 10^3. \quad (3)$$

Величины, входящие в формулу (3), рассчитываются по следующим зависимостям:

$$F(i\Delta R) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{\Delta R^m}{X_0}\right), & \text{при } i = 1; \\ \exp\left(-\frac{(i-1) \cdot \Delta R^m}{X_0}\right) - \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta R^m}{X_0}\right), & \text{при } i \geq 1; \end{cases} \quad (4)$$

где  $m$  и  $X_0$  – параметры распределения Вейбулла, описывающего распределение вершин зерен на РПК по высоте.

Ширина единичного среза определяется по зависимостям:

$$b'[(N-i-N_1+2)\Delta R] = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho [(N-i-N_1+2) \cdot \Delta R] - [(N-i-N_1+2)\Delta R]^2}, \\ \text{при } (N-i-N_1+2)\Delta R < \rho \cdot (1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}); \\ 2 \cdot \left\{ \sqrt{2 \cdot \rho \cdot a_z - a_z^2} + [(N-i-N_1+2) \cdot \Delta R - a_z] \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \right\}, \\ \text{при } (N-i-N_1+2)\Delta R \geq \rho \cdot (1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}); \end{cases} \quad (5)$$

$a_z$  – толщина единичного среза,  $a_z = \rho \cdot \left(1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}\right)$ ;

$\varepsilon$ ,  $\rho$  – угол заострения и радиус округления вершины конической модели зерна соответственно (см. рис. 2).

При круглом наружном шлифовании коэффициент:

$$A = \frac{60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{3n}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_d + R_k}},$$

а при плоском –

$$A = \frac{60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{3n}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_k \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}.$$

Расчет суммарной ширины срезов в сечении  $AD$  начинается с предположения, что глубина шлифования равна  $\Delta R$ . В этом случае неравенство (3) принимает вид:

$$A \cdot F(\Delta R) \cdot b(\Delta R) \geq 10^3. \quad (6)$$

Если неравенство (6) не выполняется, переходят к расчету суммарной ширины срезов в предположении, что глубина шлифования равна  $2\Delta R$ , при этом результаты расчета по неравенству (6) аннулируются. В этом случае для количества интервалов  $N = 2$  неравенство (3) запишется в виде:

$$A \cdot \sum_1^2 F(\Delta R) \cdot [b'(2 \cdot \Delta R) + (\sqrt{2} - 1) \cdot b'(\Delta R)] + F(2 \cdot \Delta R) \cdot b'(\Delta R) \geq 10^3, \quad (7)$$

Если же неравенство (7) также не выполняется, переходят к расчету ширины срезов для количества интервалов  $N = 3$ :

$$A \cdot \sum_1^3 F(\Delta R) \cdot [b'(3 \cdot \Delta R) + (\sqrt{2} - 1) \cdot b'(2 \cdot \Delta R) + (\sqrt{3} - \sqrt{2}) \cdot b'(\Delta R)] + \\ + F(2 \cdot \Delta R) \cdot [b'(2 \cdot \Delta R) + (\sqrt{2} - 1) \cdot b'(\Delta R)] + F(3 \cdot \Delta R) \cdot b'(\Delta R) \geq 10^3. \quad (8)$$

Аналогичным образом рассчитывают суммарную ширину срезов до тех пор, пока неравенство (3) не выполниться.

В случае выполнения неравенства (3) параметр  $R_z$  определяется по формуле:

$$R_z = N \cdot \Delta R,$$

где  $N$  – номер интервала, на котором выполнено неравенство (3).

Как отмечалось ранее, минимально допустимое значение величины интервала расчета  $\Delta R$  определяется, исходя из условия вероятного попадания в него минимум одного зерна. Учитывая, что параметр  $R_z$  неизвестен, а также с целью повышения точности расчета, вместо базовой длины  $l_{баз}$ , на которой определяются параметры шероховатости, заменим высотой шлифовального круга  $B$ . Тогда формула для расчета минимальной величины  $\Delta R$  при внутреннем шлифовании примет вид:

$$\frac{B \cdot 60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{zn}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_d - R_k}} \cdot F(\Delta R) \geq 1, \quad (9)$$

где  $B$  – ширина шлифовального круга, мм.

Неравенство (9) рассчитывается последовательным увеличением интервала  $\Delta R$  с принятым шагом.

Для оценки влияния вида шлифования на высоту неровностей профиля  $R_z$  обработанной поверхности с использованием предложенной методики была разработана программа для ПЭВМ в среде Mathcad.

Расчеты были выполнены для плоского, внутреннего и круглого наружного шлифования кругом 1A1 250×75×16×5 AC6 100/80–4–M2-01 при следующих режимах:  $V_k = 35$  м/с,  $V_d = 6$  м/мин, диаметр внутреннего шлифуемого отверстия  $D_d = 300$  мм, диаметр обработки при круглом шлифовании  $D_d = 100$  мм.

Параметры рельефа рабочей поверхности круга: модель зерен – конус с округленной вершиной радиусом  $\rho = 6,69$  мкм и углом заострения  $\varepsilon = 91^\circ$ , расстояние между рабочими зёрнами на РПК  $S_{zn} = 0,32$  мм, распределение разновысотности зерен описывается законом Вейбулла с параметрами  $X_0 = 81,2$  и  $m = 1,45$ .

Результаты расчета (табл.) показывают, что при одинаковых условиях обработки параметр шероховатости шлифованной поверхности  $R_a$  имеет наибольшую величину при наружном шлифовании и наименьшую – при внутреннем шлифовании. Это обусловлено различными значениями дуг контакта круга с обрабатываемой

поверхностью, которые через отношение  $\frac{60 \cdot V_k}{V_\partial}$  увеличивают длину участка РПК, принимающего участие в формировании неровностей в отдельном сечении обработанной поверхности, и, как следствие, количество активных зерен (см. столбец 2 табл. 1).

Таблица. Влияние вида шлифования кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80 4 М2-01 на шероховатость обработанной поверхности стали Р6М5Ф3

Вид шлифования	Длина дуги контакта $L$ , мм	Высота неровностей профиля $R_z$ , мкм	Среднее арифметическое отклонение профиля * $R_a$ , мкм
1	2	3	4
Внутренне ( $D_\partial = 300$ мм)	0,37	1,80	0,45
Плоское	0,23	2,64	0,66
Круглое ( $D_\partial = 100$ мм)	0,16	3,44	0,86

\*Примечание: среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  определяли по параметру  $R_z$ , используя следующие зависимости [8]:  $R_a = \frac{R_z}{4}$ ,  $R_a = \frac{R_z}{5}$ , для, соответственно, диапазонов  $R_a = 0,025 \div 3,2$  мкм и  $R_a = 3,2 \div 6,3$  мкм.

### Выводы

1. При одинаковых режимах обработки наименьшее значение параметра шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  обеспечивается при внутреннем шлифовании ( $R_a = 0,45$  мкм) и наибольшее – при круглом шлифовании ( $R_a = 0,86$  мкм), что обусловлено различной длиной участка РПК, формирующего неровности в каждом исследуемом сечении поверхности детали.

2. С позиции формирования идентичных параметров шероховатости обработанной поверхности внутреннее врезное шлифование, при прочих равных условиях, позволяет вести обработку с большей производительностью по сравнению с круглым наружным и плоским врезным шлифованием.

3. Режимы шлифования, обеспечивающие заданные параметры шероховатости, найденные для одного вида шлифования нельзя переносить на другие виды шлифования.

### Список литературы

1. Ящерицын П.И. Качество поверхности и точность деталей при обработке абразивными инструментами. – Минск: Высшая школа, 1959 г. – 230 с.

2. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: ГНТИ, 1956. – 252 с.

3. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов, 1975 г. – 189 с.

4. Редько С.Г., Королев А.В. Вероятностный расчет шероховатости шлифованной поверхности. Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки. – Л.: 1974 – С. 73-79.

5. Кулинич С.И. Вероятность участия зерен шлифовального круга в процессе резания. – Резание и инструмент. 1971, №3, с. 20-24.

6. Матюха П.Г., Терехова Л.К. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. М.: МВТУ им. Баумана, 1982, №10. – С. 101-105.

7. Матюха П.Г. Исследование форм среза при врезном алмазно-искровом шлифовании // Синтетические алмазы. 1979 г. Вып. 1. С. 39-42.

8. Краткий справочник конструктора: Справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1983. – 464 с.

*Рецензент: Калафатова Л.П.*

*Надійшла до редколегії: 04.04.2011р.*

**П.Г. МАТЮХА**

**В.В. ГАБИТОВ**

Донецький національний технічний університет

**ВПЛИВ ВИДУ ШЛІФУВАННЯ НА ШОРСТКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ**

В роботі проаналізовано вплив виду шліфування на шорсткість обробленої поверхні при інших однакових умовах оброблення. Встановлено, що з позиції формування ідентичних параметрів шорсткості внутрішнє врізне шліфування дозволяє проводити оброблення з більшою продуктивністю в порівнянні з круглим зовнішнім та плоским врізним шліфуванням.

**Вид шліфування, параметр шорсткості, висота нерівностей, одиничний зріз**

**P.G. MATYUHA**

**V.V. GABITOV**

Donetsk national technical university

**INFLUENCE OF KIND OF GRINDING ON THE ROUGHNESS OF FINISHED SURFACE**

In the paper the influence of grinding kind article on the roughness of machined surface is analyzed with equal other machining conditions. It is find, that for forming of equal roughness parameters the inside cut-in grinding allows to perform the processing with highest productivity as compared with round outside grinding and plane cut-in grinding.

**Grinding kind of, roughness parameter, roughness height, single cut**