

УДК 621.923

Сергеев А. С.<sup>1</sup>, Новиков Ф. В.<sup>2</sup>, д.т.н., Шкурупий В. Г.<sup>2</sup>, к.т.н.<sup>1</sup>ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина<sup>2</sup>Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, г. Харьков, Украина

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Приведены новые аналитические зависимости, определяющие высотные параметры шероховатости поверхности при абразивной обработке с учетом износа режущих зерен. Показано, что чем больше длина площадки износа на режущем зерне (имитирующая геометрическую форму режущей части зерна), тем меньше параметры шероховатости поверхности  $R_{max}$ ,  $R_a$  и больше отношение  $R_{max}/R_a$ , которое может увеличиваться до значений 30 и более. Это согласуется с известными экспериментальными данными, полученными при абразивном полировании, характеризующемся фактически одновысотным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента. Установлено, что при больших значениях отношения  $R_{max}/R_a$  наблюдается тенденция перехода процесса резания к процессам трения и упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала. При шлифовании вследствие разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, отношение  $R_{max}/R_a$  меньше и изменяется, как установлено экспериментально, в пределах 4 ... 10. Поэтому на финишных операциях следует использовать шлифовальные круги с фактически одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки. Это позволит уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях.

**Ключевые слова:** шлифование, абразивное полирование, процесс резания, шероховатость поверхности, режущее зерно, поперечная подача

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами.** В современном производстве при изготовлении высокоточных деталей машин, по-прежнему, чрезвычайно острой является проблема обеспечения требуемых высоких показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей. Несмотря на имеющийся большой арсенал возможных методов абразивной обработки, обеспечивающих существенное уменьшение высот микронеровностей на обрабатываемых поверхностях, их применение на практике не всегда эффективно. Основной причиной является низкая производительность обработки на финишных операциях доводки и абразивного полирования. Поэтому получили применение комбинированные методы финишной абразивной обработки, удачно сочетающие эффекты доводки свободным абразивом и шлифования. Например, использование шлифовальных кругов фактически с одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки позволяет существенно уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях при достаточно высокой производительности обработки. Для определения оптимальных условий обработки с использованием этих методов необходимо разработать математические модели формирования шероховатости поверхности и обосновать условия ее уменьшения. Их практическое применение станет важным фактором повышения эффективности абразивной обработки на основе критерия наименьшей шероховатости обрабатываемой поверхности.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В научно-технической литературе приведены расчетные схемы определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке, позволяющие производить анализ и расчет параметров шероховатости поверхности и на этой основе выбирать оптимальные условия обработки [1–5]. Весьма эффективен разработанный теоретико-вероятностный подход к определению шероховатости поверхности при шлифовании [2, 3]. Однако, используя его, сложно определить параметры шероховатости поверхности с учетом изменения формы режущей части зерен, например, в связи с их износом. Поэтому актуальной является задача аналитического определения параметров шероховатости поверхности и условий их уменьшения с учетом износа режущих зерен и образования на них площадок износа. Установленные более глубокие знания закономерностей формирования шероховатости обрабатываемой поверхности позволяют научно

обоснованно подходить к определению условий повышения эффективности финишной абразивной обработки.

**Цель работы** – аналитическое описание параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке и определение условий их уменьшения.

**Материалы исследований.** Для обобщенного анализа закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке рассмотрим упрощенный теоретический подход к расчету параметров шероховатости поверхности. Предположим, что обработка производится режущими зёрнами конусообразной формы одинаковой высоты с углом при вершине  $2\gamma$ . При их наложении на диаметрально расположенную плоскость (имитирующую обрабатываемый образец) образуется режущий профиль с равноудаленными проекциями вершин зёрен (рис. 1,а). Относительная полнота этого профиля  $\varepsilon(y)$  и противоположная функция  $\Phi(y)=1-\varepsilon(y)$  описываются прямыми линиями на этом же рисунке. Следовательно, величина  $a$ , определяющая положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности, равна  $a=0,5 \cdot v$  (рис. 1,а), а параметр шероховатости поверхности  $R_a=0,25 \cdot v$ , где  $v$  – высота выступания вершин неизношенных зёрен над уровнем рабочей поверхности абразивного инструмента, м. Это вытекает из условия:  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где

$F_1 = \frac{1}{8} \cdot v \cdot 1$  – площадь треугольника. Отсюда вытекает отношение:  $v/R_a = 4$  или с учетом условия  $v = R_{max}$  имеем:  $R_{max}/R_a = 4$ . Полученное теоретически значение отношения  $R_{max}/R_a = 4$  согласуется с известными экспериментальными данными [6], полученными при шлифовании.

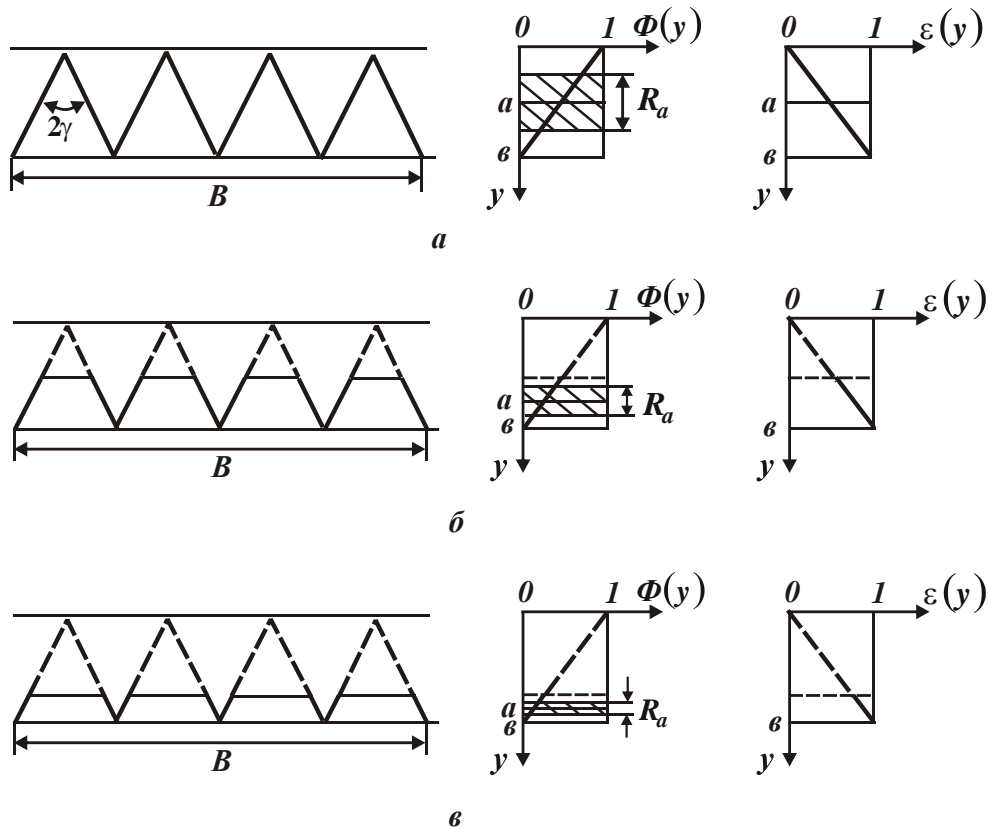


Рис. 1. Расчетная схема параметров шероховатости поверхности

Рассмотрим случай абразивной обработки режущими зёрнами одинаковой высоты с образованными на их вершинах площадками износа одинаковой длины  $x_1 = 0,5 \cdot \text{tg} \gamma \cdot v$  (рис. 1,б), которые имитируют геометрическую форму режущей части зёрна. В этом случае функции  $\varepsilon(y)$  и  $\Phi(y)$  имеют вид, показанный сплошной линией на рис. 1, б. Очевидно, величина

$a = 0,75 \cdot \epsilon$ , а параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot \epsilon \cdot 1 \right)$ . Соответственно, отношение  $\epsilon / R_a = 16$  или с учетом условия  $\epsilon = 2 \cdot R_{max}$  принимает значение  $R_{max} / R_a = 8$ .

Как видно, с образованием на режущих зернах площадок износа отношение  $R_{max} / R_a$  увеличилось до значения, которое нетипично для процесса шлифования, однако имеет место при абразивном полировании. Так, в работе [7] показано, что при абразивном полировании (рис. 2) экспериментально установленное значение  $R_{max} / R_a = 30$ , т.е. это значение еще больше превышает теоретически установленное значение, равное  $R_{max} / R_a = 8$ .

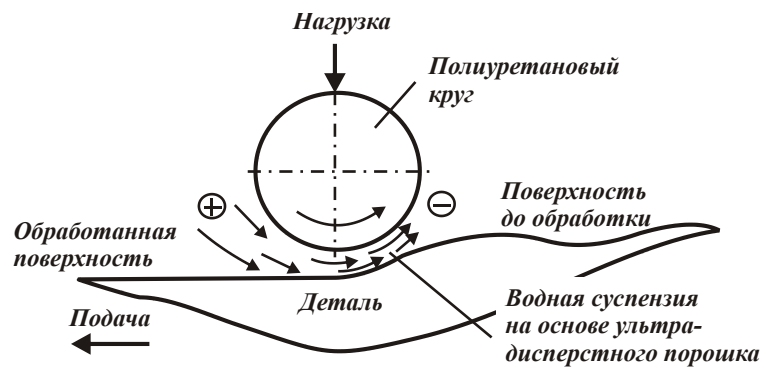


Рис. 2. Схема полирования суспензией на основе ультрадисперсного порошка

Производя аналогично расчеты параметра шероховатости поверхности  $R_a$  при абразивной обработке режущими зёрнами с еще большими длинами площадок износа, например, с  $x_1 = 0,25 \cdot \text{tg} \gamma \cdot \epsilon$  (рис. 1,в), из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{16} \cdot \epsilon \cdot 1 \right)$ , установлено отношение  $\epsilon / R_a = 64$ . С учетом условия  $\epsilon = 4R_{max}$  отношение  $R_{max} / R_a = 16$ . В этом случае отношение  $R_{max} / R_a$  увеличилось в 2 раза по сравнению с предыдущим случаем.

С увеличением длины площадки износа на режущем зерне до значения  $x_1 = 0,125 \cdot \text{tg} \gamma \cdot \epsilon$ , из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{64} \cdot \epsilon \cdot 1 \right)$ , установлено отношение  $\epsilon / R_a = 254$ . С учетом условия  $\epsilon = 8 \cdot R_{max}$  отношение  $R_{max} / R_a = 32$ . Как видно, теоретически установленное значение отношение  $R_{max} / R_a$  примерно совпадает с экспериментально установленным значением, равным  $R_{max} / R_a = 30$ . Это указывает на то, что длина площадки износа на режущих зёрнах оказывает значительное влияние на отношение  $R_{max} / R_a$ . Следовательно, добиться уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  можно за счет создания на режущих зёрнах площадок износа, т.е. создания так называемых «плосковершинных» зёрен [6], или применения овализированных абразивных зёрен [7].

Необходимо отметить, что приведенные результаты расчетов справедливы при обработке абразивным инструментом без поперечной подачи. В противном случае закономерности формирования шероховатости поверхности изменятся в связи с разновысотным наложением проекций зёрен на диаметрально расположенную плоскость. А это приведет к увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_a$ . Чем значительнее поперечная подача абразивного инструмента, тем в большей мере будет проявляться разновысотное наложение проекций зёрен на диаметрально плоскость и, соответственно, больше будет параметр шероховатости

поверхности  $R_a$ . Поэтому при высокопроизводительном шлифовании, несмотря на возможность образования на режущих зернах значительных площадок износа, параметр шероховатости поверхности  $R_a$  будет существенно увеличиваться. Очевидно, уменьшить его можно в условиях абразивного полирования при весьма малых значениях поперечной подачи с обеспечением достаточно высоких значений отношения  $R_{max}/R_a > 4$ .

Если рассматривать в первом приближении в качестве толщины среза режущим зерном  $a_z$  параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$ , то при абразивном полировании наблюдается тенденция перехода от процесса резания к процессам трения и упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала с абразивным зерном (без образования микростружки). Данная закономерность возможна лишь в условиях абразивного полирования, осуществляемого при фактически одновысотном расположении зерен на рабочей поверхности инструмента, и с небольшой поперечной подачей. При обычном шлифовании, как отмечалось выше, такой процесс обработки неосуществим в связи с разновысотным расположением режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального абразивного круга, а также в связи с увеличенной поперечной подачей. В этом случае отношение  $R_{max}/R_a$  меньше и изменяется, как установлено экспериментально [1,6], в пределах 4 ... 10. Поэтому на финишных операциях следует использовать шлифовальные круги фактически с одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки. Это позволит уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях.

Исходя из предложенного теоретического подхода определения отношения  $R_{max}/R_a$ , можно установить обобщенную аналитическую зависимость этого отношения. Для этого следует высоту  $\epsilon$  разбить на  $z$  одинаковых частей. Тогда площадь треугольника  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{\epsilon}{z} \cdot \frac{1}{z} \right)$ ,

а с учетом условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$  имеем:  $R_a = \frac{1}{4} \cdot \frac{\epsilon}{z^2}$ . С учетом  $\epsilon = z \cdot R_{max}$  окончательно получено:

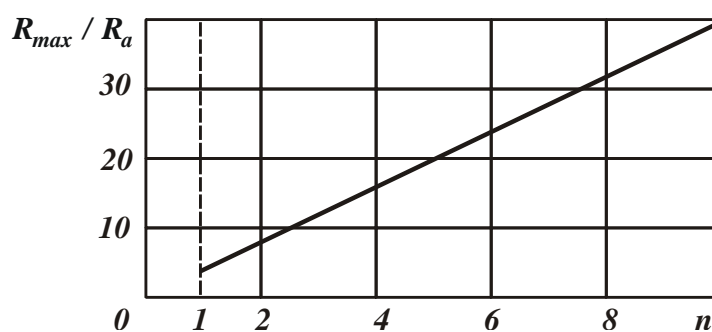
$$\frac{R_{max}}{R_a} = 4 \cdot z. \quad (1)$$

В табл. 1 и рис. 3 приведены расчетные значения отношения  $R_{max}/R_a$  в зависимости от величины  $z$ . Как видно на рис. 3, значения отношения  $R_{max}/R_a$  увеличиваются по линейной зависимости с увеличением величины  $z$ .

Таблица 1

Расчетные значения отношения  $R_{max}/R_a$ 

$z$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{max}/R_a$	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40

Рис. 3. Зависимость отношения  $R_{max}/R_a$  от величины  $z$ 

Таким образом, по известному значению  $z$ , исходя из зависимости (1), можно определить отношение  $R_{max}/R_a$  или, наоборот, по известному значению  $R_{max}/R_a$  определить значение  $z$ .

Параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  определяется из условия:  $2 \cdot \epsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n = B$ , где  $n$  – количество абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, шт. Тогда с учетом зависимости  $\epsilon = z \cdot R_{max}$  имеем:

$$R_{max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot z \cdot n}. \quad (2)$$

Как видно, основными условиями уменьшения параметра  $R_{max}$  является увеличение величины  $z$  и количества режущих зерен  $n$ .

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется из зависимости (1):

$$R_a = \frac{B}{8 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot z^2 \cdot n}. \quad (3)$$

Существенно уменьшить параметр  $R_a$  можно, главным образом, за счет увеличения величины  $z$ , т.е. увеличения длины площадки износа на режущем зерне  $x_1$ .

Таким образом теоретически установлено, что чем больше величина  $x_1$  и больше зерен участвует в формировании шероховатости поверхности, тем меньше параметры  $R_{max}$ ,  $R_a$  и больше отношение  $R_{max}/R_a$ . Это согласуется с экспериментальными данными. Используя полученные результаты расчетов, можно научно обоснованно подходить к разработке эффективных технологических процессов финишной абразивной обработки.

**Выводы.** Полученные аналитические зависимости для определения основных параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке с учетом износа режущих зерен. Показано, что чем больше длина площадки износа на режущем зерне (имитирующая геометрическую форму режущей части зерна), тем меньше параметры шероховатости поверхности  $R_{max}$ ,  $R_a$  и больше отношение  $R_{max}/R_a$ , которое может увеличиваться до значений 30 и более. Это согласуется с известными экспериментальными данными, полученными при абразивном полировании, характеризующемся фактически одновысотным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента. Установлено, что при больших значениях отношения  $R_{max}/R_a$  наблюдается тенденция перехода процесса резания к процессам трения и упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала без образования микростружек. При шлифовании вследствие разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, отношение  $R_{max}/R_a$  меньше и изменяется, как установлено экспериментально, в пределах 4 ... 10. Поэтому на финишных операциях следует использовать шлифовальные круги с фактически одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки. Это позволит уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях.

**Перспективы дальнейшей работы в данном направлении.** В дальнейших исследованиях необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования процесса абразивной обработки инструментом со связанным абразивом, у которого режущие зерна выступают из связки на одинаковую высоту. Это позволит оценить технологические возможности уменьшения шероховатости поверхности для указанных условий обработки.

#### Информационные источники

1. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
3. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов, 1979. – 232 с.
4. Евсеев Д. Г., Сальников А. И. Физические основы процесса шлифования. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.
5. Братан С. М. Технологічні основи забезпечення якості і підвищення стабільності високопродуктивного чистового та тонкого шліфування: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Одеса, 2006. – 35 с.

6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. «Точность обработки деталей машин». – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.

7. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Одеса, 2006. – 21 с.

**Сергеев О. С.<sup>1</sup>, Новиков Ф. В.<sup>2</sup>, д.т.н., Шкурупій В. Г.<sup>2</sup>, к.т.н.**

<sup>1</sup>ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ

*Наведено нові аналітичні залежності, що визначають висотні параметри шорсткості поверхні при абразивній обробці з урахуванням зносу різальних зерен. Показано, якщо більша довжина площадки зносу на різучому зерні (що імітує геометричну форму різальної частини зерна), то менше параметри шорсткості поверхні  $R_{max}$ ,  $R_a$  і більше відношення  $R_{max}/R_a$ , яке може збільшуватися до значень 30 і більше. Це узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими при абразивному поліруванні, яке характеризується фактично одновисотним розташуванням абразивних зерен на робочій поверхні інструменту. Встановлено, що при великих значеннях відношення  $R_{max}/R_a$  спостерігається тенденція переходу процесу різання до процесів тертя і пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу. При шліфуванні внаслідок різновисотного розташування абразивних зерен на робочій поверхні шліфувального круга відношення  $R_{max}/R_a$  менше і змінюється, як встановлено експериментально, в межах 4 ... 10. Тому на фінішних операціях слід використовувати шліфувальні круги з фактично одновисотним виступанням різальних зерен над рівнем зв'язки. Це дозволить зменшити висоти мікронерівностей на оброблених поверхнях.*

**Ключевые слова:** шліфування, абразивне полірування, процес різання, шорсткість поверхні, різальне зерно, поперечна подача

**Serhieiev O. S.<sup>1</sup>, Novikov F. V.<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Skurupy V. G.<sup>2</sup>, Ph.D**

<sup>1</sup>GVUZ «Priazovsk State Technical University», Mariupol, Ukraine

<sup>2</sup>Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

### CALCULATION OF SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS AT ABRASIVE TREATMENT

*New analytical relationships are given that determine the altitude parameters of surface roughness during abrasive machining, taking into account the wear of cutting grains. It is shown that the greater the length of the wear area on the cutting grain (simulating the geometric shape of the cutting part of the grain), the lower the surface roughness parameters  $R_{max}$ ,  $R_a$  and the greater the ratio  $R_{max}/R_a$ , which can increase to values of 30 or more. This is consistent with the known experimental data obtained by abrasive polishing, characterized in fact by a single-height arrangement of abrasive grains on the working surface of the tool. It has been established that for large values of the  $R_{max}/R_a$  ratio, a tendency is observed in the transition of the cutting process to friction and elasto-plastic deformation of the processed material. When grinding due to the uneven location of the abrasive grains on the working surface of the grinding wheel, the ratio  $R_{max}/R_a$  is less and varies, as established experimentally, within 4 ... 10. Therefore, grinding operations should be used in the finishing operations with the cutting heads protruding almost at the same height above the level of the bond. This will reduce the height of the microroughness on the machined surfaces.*

**Keywords:** grinding, abrasive polishing, cutting process, surface roughness, cutting grain, transverse feed