

УДК 621.45

**Р. Г. Гришин**, канд. техн. наук, **Н. В. Носов**, д-р техн. наук, проф,  
**И. М. Сальников**, магистр, **Я. М. Гордиенко**, аспирант, **Р. В. Ладыгин**, ст. преп.  
Самарский государственный технический университет, Россия  
Тел. / Факс: 8 (846) 332-10-90; *E-mail*: nosov.nv@samgtu.ru

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МЕХОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*В статье предложена методика расчета шероховатости поверхности при обработке абразивными инструментами, в том числе и инструментами из СВС-материалов. Проведен анализ существующих подходов к расчету высоты микронеровностей обработанной поверхности при шлифовании, в которой учитывалась глубина срезаемого единичным зерном слоя и величина пластического выдавливания. Предложены научно-обоснованные рекомендации по управлению параметрами шероховатости поверхности*

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, параметры абразивного инструмента, режимы шлифования, глубина внедрения зерен, абразивные СВС-материалы.

**R. G. Grishin, N. V. Nosov, I. M. Salnikov, Ya. M. Gordienko, R. V. Ladyagin**

## DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CALCULATING SURFACE ROUGHNESS DURING MACHINING WITH AN ABRASIVE TOOL

*The article proposes a method for calculating the surface roughness during processing with abrasive tools, including tools made of SHS materials. The analysis of existing approaches to the calculation of the height of the micro-roughness of the treated surface during grinding, which took into account the depth of the layer cut by a single grain and the amount of plastic extrusion. Scientifically-based recommendations on the control of surface roughness parameters are proposed*

**Keywords:** surface roughness, abrasive tool parameters, grinding modes, grain penetration depth, abrasive SHS materials.

### Введение.

Исследованием шероховатости поверхности при шлифовании занимались большое количество авторов [1 - 4]. Большую роль в образовании шероховатости при шлифовании абразивными инструментами оказывает пластическая деформация зерен [5-6].

Влияние пластической деформации металла на высоту неровностей занимался Филимонов А. Н. [7], которым установлено, что в зависимости от марки обрабатываемого материала, радиуса округления вершин зёрен и толщина срезаемого слоя  $a_z$  наплывы увеличивают шероховатость поверхности на 20-80%. Автор определял шероховатость обработанной поверхности, через определение величины  $a_z$  для различных условий шлифования

$$R_z = C_z \cdot a_z + h_n \quad , \quad (1)$$

где  $C_z$  - коэффициент пропорциональности.

Эта зависимость более приемлема для инженерных расчетов. В тоже время, если принять, что рабочая поверхность круга обладает свойствами эргодичности, то через определенное число наложений возникает равновесный эффективный профиль высотой  $a_z$ , тогда  $C_z = 1$

Таким образом, образование наплывов при шлифовании за счет работы деформирующих зёрен неизбежно. Для определения максимальной высоты наплывов сравним площадь стружечной канавки  $F_{стр}$  и площадь наплывов  $F_n$ . Площадь стружечной канавки

$$F_{стр} = b_z \cdot a_z$$

где  $b_z$  - ширина срезаемой стружки.

По данным [8-9] ширина  $b_z$  связана с глубиной врезания  $a_z$  параболической зависимостью

$$b_z = 2\sqrt{2\rho_3 \cdot a_z},$$

тогда  $F_{стр} = 2a_z \cdot \sqrt{2\rho_3 \cdot a_z}.$

В то же время, если стружка не срезалась при работе зерна, то эта площадь перераспределялась в наплывы, образовавшиеся по сторонам риски, тогда максимальную высоту напыла

$$h_{n\max} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot a_z \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_3 \cdot a_z}}. \quad (2)$$

Расчеты по формуле (2) показывают, что  $h_{n\max}$  всегда больше  $a_z$ . Так, например, при  $a_z = 0.002$  мм и  $\rho_3 = 0.02$  мм,  $h_{n\max} = 0.0067$  мм, т.е.  $R_{z\max} = 0.002 + 0.0067 = 0.0087$  мм или  $R_{a\max} \approx 2.0$  мкм. В реальных процессах, когда образуется стружка высота наплывов всегда несколько меньше  $h_{n\max}$ , т.к. часть объема металла удаляется с поверхности заготовки.

### Методика исследования

Для получения количественных зависимостей влияния процесса шлифования на величину  $a_z$  используем схему прерывистого микрорезания единичным зерном в условиях круглого наружного и плоского шлифования периферией или торцом круга.

При этом найдем величину  $a_z$  через относительную критическую глубину внедрения зерен

$$a_z = \frac{p^{0.7} \cdot t}{0.023 \cdot V_k^{0.53} (1 - \sin \gamma_k)}, \quad (3)$$

где  $t$  – глубина резания при шлифовании с продольной подачей, при шлифовании с врезной подачей

$$t = \frac{S_r}{n};$$

где  $n$  – число оборотов заготовки об/мин;  $\gamma_k = (-60^\circ) \dots (-80^\circ)$  – для условий чистового и получистового шлифования.

Сравнение расчетов по произведенным формулам показывает значительный разброс величины  $a_z$ . Анализ схем стружкообразования и экспериментальные замеры  $a_z$

позволили автору рекомендовать, в качестве наиболее близкого к фактической форме среза, расчеты по формуле (3).

Подставив найденное значение  $a_z$  в формулу (1) можно определить величину  $R_z$ . Предложенные формулы по расчету  $R_z$  не исключают применение эмпирических зависимостей, связывающие шероховатость поверхности с режимами и условиями обработки, а лишь дополняет их. Данными расчетами можно пользоваться при обосновании выбора оптимальных характеристик АИ при минимально необходимых режимных параметрах.

Рассмотрим порядок определения шероховатости при внутреннем врезном шлифовании заготовки  $\varnothing 75$  из Ст.40Х НРС 55 абразивным кругом ПП 63x16x40 СВС КР 25 СМ1 6 К5 при скорости резания 40 м/с и  $Q_{уд}=100$  мм<sup>2</sup>/мин [10, 14]

1. Задаемся скоростью вращения заготовки из условия  $\frac{V_k}{V_1} = 50$ , т.е.  $V_1=48$ м/мин, что соответствует

$$n = \frac{1000 \cdot V_1}{\pi \cdot d_3} = \frac{1000 \cdot 48}{\pi \cdot 75} = 200 \text{ об/мин.}$$

Тогда подача на врезание будет равна

$$S_2 = \frac{Q_{уд} \cdot n}{V_1 \cdot 1000} = \frac{100 \cdot 200}{48 \cdot 1000} = 0.42 \text{ мм/мин.}$$

2. Для зернистости 25 СВС КР определяем радиус вершины зерна при  $\varepsilon_{cp} = 98^\circ$ .

$$\rho = 0.13 \cdot \frac{d_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon_{cp}}{2} = 0.13 \cdot \frac{0.265}{2} \cdot \operatorname{tg} 49 \approx 0.02 \text{ мм.}$$

3. Пользуясь формулой (3), находим величину  $a_z$  при  $\gamma_k = -70^\circ$

$$a_z = \frac{0.02^{0.7} \cdot 0.42}{0.023 \cdot (40 \cdot 60)^{0.53} [1 - \sin(-70^\circ)] \cdot 200} = 0.0016 \text{ мм.}$$

4. Определим максимальную высоту наплывов  $h_{нmax} = 0,0021$ мм по формуле 2.

5. Подставим полученные значения в формулу (1)

$$R_z = 0.0016 + 0.0021 = 0.0037 \text{ мм или } R_a = 0.92 \text{ мкм.}$$

Исследования показали, что большое влияние на среднее арифметическое отклонение профиля поверхности оказывает зернистость абразивного круга. С увеличением размера зерна  $d_0$  величина  $R_a$  повышается. Это связано с тем, что с увеличением диаметра зерна необходимо повысить относительную критическую глубину внедрения зерна.

Сравнение шероховатости поверхности после обработки АИ с разными марками абразивного материала показывает, что при шлифовании кругами из СВС материалов

$R_a$  снижается для кругов зернистостью меньше 16, т.к. зерна СВС имеют радиус закругления больше, чем у обычных абразивов 91А и 24А.

Таким образом, исследования показали, что шероховатость поверхности при шлифовании кругами из СВС КР увеличивается пропорционально повышению радиуса закругления вершины зерна, врезной подачи и обратно пропорционально скорости вращения круга и заготовки, а также твердости обрабатываемого материала [13].

Для подтверждения теоретических предпосылок формирования шероховатости обработанной поверхности были проведены исследования влияния характеристик АИ на величину  $R_a$  при внутреннем шлифовании сталей.

Исследования показали, что большое влияние на среднее арифметическое отклонение профиля поверхности оказывает зернистость абразивного круга. С увеличением размера зерна  $d_0$  величина  $R_a$  повышается. Это связано с тем, что увеличение радиуса закругления вершины зерна  $\rho$  требует также увеличить относительную критическую глубину внедрения зерна  $\varepsilon_{кр}$ .

Теоретические исследования показали, что при заданных условиях и режимах шлифования величина  $R_a$  при обработке, например, ст.ШХ-15 АК из СВС КР с увеличением зернистости от 6 до 40 растёт от  $R_a=0,45$  мкм до  $R_a=1,6$  мкм.

Сравнивая расчеты по формуле (1) с экспериментальными данными видим, что расхождение значений не превосходит 20%. Уменьшение твердости стали с HRC 64 до HRC 59 повышает шероховатость на 14 - 26%. С увеличением твердости круга величина  $R_a$  снижается для всех характеристик АИ и не зависит от марки абразивного материала. Это связано с тем, что увеличивается количество связки для более твердых кругов и уменьшается микротвердость абразивного круга  $H_{\mu_a}$ , с  $H_{\mu_a}=20$  ГПа (твердость М3) до  $H_{\mu_a}=18$  ГПа (твердость СТ1), т.е. снижается режущая способность кругов, за счет уменьшения величины  $a_z$ .

### Результаты и обсуждение

Сравнение работоспособности АИ с разными марками абразивного материала показывает, что при обработке кругами из СВС корунда шероховатость поверхности снижается для кругов зернистостью меньше 16, т.к. СВС КР имеют радиус закругления зёрен от 6 до 16 зернистости больше, чем у обычных абразивов 91А и 24А. В тоже время для кругов зернистости больше 25 наблюдается некоторое увеличение параметра  $R_a$ . Данная тенденция сохраняется и при обработке кругами разной твердости. Следует отметить, что разброс средних значений шероховатости для разных марок абразивных кругов незначительный и составляет не более 25-30 %. Большое влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывают режимы обработки, в частности поперечная подача  $S_2$  и скорость вращения заготовки  $V_1$ .

Исследованиями установлено, что с увеличением  $S_2$  величина  $R_a$  повышается. Экспериментальные данные хорошо коррелируются с результатами расчета по формуле (1) ( $r_{xy}=0.82$ ), особенно для кругов из СВС КР, т. к. в расчетную зависимость подставлялись геометрические параметры именно этих зерен. Анализ полученных зависимостей показал, что при чистовых режимах шлифования  $S_2=0,15...0,25$  мм/мин кругами из СВС КР величина  $R_a$  меньше чем для кругов из 91А и 24А, а на получистовых  $S_2 > 0,3$  мм/мин наблюдается обратная картина, что связано, на наш взгляд с более существенным увеличением микротвердости АИ из СВС КР  $H_{\mu_a}$  и увеличении глубины внедрения зерен в обрабатываемый материал. Повышение скорости вращения заготовки при врезном шлифовании приводит к уменьшению шероховатости поверхности, что

подтверждают результаты многочисленных исследований [10]. Это связано с тем, что при данной схеме обработки с постоянной  $S_2$  повышение скорости вращения заготовки  $V_1$  приводит к уменьшению фактической глубины срезаемого единичным зерном слоя и это в свою очередь снижает шероховатость поверхности.

Таким образом, исследования показали, что шероховатость поверхности при шлифовании кругами из СВС КР увеличивается пропорционально повышению радиуса закругления вершины зерна, врезной подачи и обратно пропорционально скорости вращения круга и заготовки, а также твердости обрабатываемого материала. Кроме этого на величину  $R_a$  оказывают влияние и другие факторы, которые не учитываются при расчете по формуле (1). Экспериментальные исследования показали, что такими параметрами процесса являются: состав СОЖ, диаметр обрабатываемой поверхности, ширина круга, количество зачистных проходов, прерывистость процесса шлифования и др. [11-12].

Математическая обработка опытных данных позволила вывести эмпирическую формулу по расчету шероховатости поверхности, аналогично зависимости, предложенной Е.Н. Масловым [6]

$$R_a = \frac{C_a \cdot V_1^{Y_a} \cdot t^{Z_a} \cdot S_1^{U_a} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}{V_k^{X_a} \cdot d_3^\mu \cdot H^n}, \quad (4)$$

где  $C_a$  – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала в частности его твердость по HRC,  $X_a, Y_a, Z_a, U_a$ , и  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – соответственно показатели степени и коэффициенты пропорциональности.

Расчёты показывают, что величина  $C_a$  колеблется от 30 до 60 и с увеличением твердости обрабатываемого материала уменьшается, т. е.  $C_a=30$  будет соответствовать HRC 66, а  $C_a=60$  HRC 18, тогда

$$C_a = C_{a\max} - \alpha_a \cdot HRC,$$

где  $C_{a\max}=70$ , а  $\alpha_a=0.6$ .

Рассмотрим пример расчета шероховатости поверхности при внутреннем врезном шлифовании поверхности заготовки. Исходные данные для расчета см. задачу приведенную выше. Так как у нас процесс врезного шлифования, то в формуле (4) показатель степени  $U_a$  и  $h$  равны 0, поэтому формула имеет вид

$$R_a = \frac{C_a \cdot V_1^{Y_a} \cdot t^{Z_a} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}{V_k^{X_a} \cdot d_3^\mu}. \quad (5)$$

При этом  $K_1=1,0; K_2=1,0; K_3=1,4$  (т.к. зачистные проходы отсутствуют),  $K_4=1,0$ . Величина  $t_\phi$  в данном выражении определяется как  $\frac{S_2}{n_3}$ , тогда формула (5) преобразуется к виду:

$$R_a = \frac{C_a \cdot V_1^{Y_a} \cdot S_2^{Z_a} \cdot K_3}{V_k^{X_a} \cdot d_3^\mu \cdot n_3^{Z_a}}. \quad (6)$$

Находим показатели степени согласно [10], при  $C_a=70-0,6\cdot 55=37$  и подставляем в формулу (6). Получим:

$$R_a = \frac{37 \cdot 48^{0.75} \cdot 0.42^{0.5} \cdot 1.4}{40^{0.95} \cdot 70^{0.1} \cdot 218^{0.5}} = 0.82 \text{ мкм.}$$

Следовательно, расчеты по формулам (4) и (6) показывают, что расхождение среднего арифметического отклонения профиля поверхности составило 12%, что говорит о хорошей сопоставимости расчетных зависимостей. Следует заметить, что значения  $R_a$  укладывается в пределы разброса, полученного при расчетах по формуле (6) - верхняя граница и формула (4) - нижняя граница. Взаимную корреляцию данных формул можно найти приняв

$$V_1 = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot n_3}{1000}.$$

Если подставить значение  $V_1$  в формулу (6), то получим

$$R_a = \frac{C_a \cdot C_1 \cdot S_2^{Z_a} \cdot K_3}{V_k^{Y_a}},$$

где произведение  $C_a \cdot C_1 \cdot K_3=41,4$ , что практически совпадает с постоянным коэффициентом в формуле (4)

$$\frac{1}{0,023} \approx 43,4,$$

поэтому указанные формулы можно использовать для инженерных расчетов, а предложенная модель формирования шероховатости поверхности адекватна не только опытным данным, но и результатам исследований других авторов [1, 5, 11,12].

### Выводы

Таким образом, теоретико-экспериментальные исследования шероховатости поверхности позволили сделать следующие выводы:

1. Анализ существующих подходов к расчету высоты микронеровностей обработанной поверхности при шлифовании показывает, что наиболее приемлемым является модель, предложенная Л.Н. Филимоновым, в которой учитывается глубина срезаемого единичным зерном слоя и величина наплывов. В этом случае величина  $a_z$  рассчитывается по формуле (1).

2. Экспериментальные исследования шероховатости поверхности показали, что с увеличением зернистости АИ из СВС КР в 4 раза величина  $R_a$  повышается в 3 раза, а с увеличением твердости круга уменьшается. При этом экспериментальные данные коррелируются с расчетами по формуле (1).

3. После обработки экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость (формула (4)), которая подтверждает результаты расчета по формуле (1), однако количественно величина шероховатости на 10-20% ниже расчетных и опытных данных.

4. Сравнение шероховатости обработанной поверхности АИ из СВС КР с другими абразивными материалами (91А и 24А) показывает, что для зернистости от 6 до 16 она меньше на 10-15%, а для 25 до 40 больше. Это связано, с одной стороны, с тем, шлифпорошки СВС КР имеют более округлую форму, чем шлифзерна, а с другой более развитый микрорельеф поверхности зерна.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Абразивные материалы и инструменты: Каталог – справочник / Под ред. В. А. Рыбакова. – М.: НИИМаш, 1976. – 375 с.
3. Корчак, С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. / С.Н. Корчак – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. Лоскутов, В. В. Шлифование металлов / В. В. Лоскутов. – М.: Машиностроение, 1979. – 243 с.
5. Лурье, Г. Б. Шлифование металлов. / Г. Б. Лурье – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
6. Маслов, Е. Н. Теория шлифования металлов. / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
7. Филимонов, Л. Н. Высокоскоростное шлифование. / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
8. Семко, М. В. Шлифование фасонных поверхностей деталей машин. / М. В. Семко, А. И. Грабченко. – Самара: Самарское книжное изд-во, 1993. – 207 с.
9. Якимов, А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
10. Носов, Н. В. Технологические основы проектирования абразивных инструментов. / Н. В. Носов, Б. А. Кравченко. – М.: «Машиностроение -1». 2003. – 257 с.
11. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении. / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченко – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
12. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч.1. Состояние рабочей поверхности инструмента. / А.В. Королев, Ю. К. Новоселов – Саратов: изд-во Саратовского университета, 1987. – 160 с.
13. Носов, Н.В. Абразивные СВС - материалы и инструменты. / Н. В. Носов, В. И. Юхвид, Б. А. Кравченко, В. Л. Китайкин – Самара, 1996. – 320 с.
14. Носов, Н. В. Исследование шероховатости поверхности конических роликовых подшипников. / Н. В. Носов, Л. Н. Михайлова. – Журнал Известие СНЦ РАН. – Т. 20. – № 4-2, 2018. – С. 232-237.

Поступила в редколлегию 02.02.2022г.