

*Н.В. Азарова, канд. техн. наук,
Донецкий национальный технический университет*

ВЫБОР РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Для обеспечения требуемых значений эксплуатационных показателей деталей машин в ходе механической обработки необходимо сформировать определенную совокупность геометрических и физико-механических параметров качества их поверхностей, что наиболее часто достигается на технологических операциях шлифования, позволяющих обеспечить высокие точность размеров и качество обрабатываемой поверхности.

При изготовлении изделий из труднообрабатываемых материалов в настоящее время в качестве чистовой операции используется алмазное шлифование кругами на металлических связках с электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность круга (РПК), как на стадии правки, так и в процессе шлифования. При этом заданные параметры качества шлифованных поверхностей, в частности параметры шероховатости, обеспечиваются, как правило, подбором условий обработки.

В настоящее время существует два подхода к назначению режимов шлифования: режимы, обеспечивающие регламентируемые параметры шероховатости поверхности, определяют из зависимостей, найденных экспериментально, либо рассчитывают аналитически [1]. Большинство предлагаемых методик расчета основано на допущении об абсолютной жесткости системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД). В этом случае не учитывается влияние имеющихся всегда в наличии колебаний системы СПИД (в частности, вынужденных колебаний, вызванные дисбалансом круга, которые балансировкой можно только уменьшить, но не устранить) на параметры шероховатости обработанной поверхности, что может привести к существенному расхождению теоретически полученных результатов с данными реальной обработки. В связи с этим определение механических режимов, обеспечивающих заданные параметры шероховатости шлифованной поверхности, с учетом возникающих при обработке радиальных колебаний круга, является актуальной задачей.

Целью работы является аналитическое определение режимов плоского алмазного шлифования, обеспечивающих заданные параметры шероховатости обработанной поверхности, с учетом геометрических параметров РПК и параметров радиальных колебаний шлифовального круга, возникающих в процессе обработки.

Предложенная нами методика [2] расчета комплекса параметров шероховатости шлифованной поверхности, предусмотренных ГОСТом [3], позволяет решить и обратную задачу: зная геометрические параметры режущей поверхности круга и параметры радиальных колебаний, возникающих в процессе шлифования, рассчитать режимы обработки, обеспечивающие заданную максимальную высоту неровностей профиля R_{max} (или высоту микронеровностей R_z).

Исходными данными для расчета являются:

- 1) элементы профиля рабочей поверхности круга – угол заострения ε , градус, и радиус округления ρ , мкм, вершины зерна; расстояние s_{3n} между зернами на рабочей поверхности, мм; параметры α, β функции распределения разновысотности зерен $F(\Delta R)$ установившегося рельефа РПК;
- 2) режимы обработки – скорость круга v_k , м/с; скорость детали v_d , м/мин; фактическая глубина шлифования t_{ϕ} , мм;
- 3) геометрические размеры круга – радиус круга R_k , мм;
- 4) амплитуда A , мкм, и частота f , Гц, радиальных колебаний шлифовального круга;
- 5) величина интервала расчета ΔR , мкм.

Используя паспортные данные станка, которые определяют скорость круга v_k , можно найти продольную скорость стола (скорость детали) v_d . Рассчитанная таким образом скорость детали $v_{d.p.}$ обеспечивает не только заданную высоту неровностей, но и определяет максимальную производительность на данном оборудовании при заданной высоте шероховатости, если при этих режимах не наблюдаются нежелательные изменения физико-механических свойств поверхностного слоя. Действительно, устанавливая $v_d < v_{d.p.}$, мы обеспечим заданную высоту неровностей, но необоснованно уменьшим производительность.

Для определения условий перекрытия срезов при расчете высоты микронеровностей R_z или максимальной высоты неровностей профиля R_{max} используется соотношение (1), которое позволяет определить момент перекрытия срезов по известным скоростям v_d, v_k , параметрам радиальных колебаний, а также параметрам РПК.

$$\frac{60v_k}{v_d s_{3n}^2} \sqrt{2R_k \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}} \cdot \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^{N-i+1} (\sqrt{N_1+i-1} - \sqrt{N_1+i-2}) \times$$

$$\times \left[k \left(N_1 \cdot \Delta R - \sum_{j=0}^{N_1+i-2} A_{y_j} \right) \cdot b \left(N_1 \cdot \Delta R - \sum_{j=0}^{N_1+i-2} A_{y_j} \right) + \right. \quad (1)$$

$$\left. + k \left(N_1 \cdot \Delta R - \left(\sum_{j=1}^N A_{y_j} + \sum_{j=N_1+i}^N A_{y_j} \right) \right) \cdot b \left(N_1 \cdot \Delta R - \left(\sum_{j=1}^N A_{y_j} + \sum_{j=N_1+i}^N A_{y_j} \right) \right) \right] \geq 10^3$$

где N – количество исследуемых интервалов, $N=1, 2, \dots, K$;

i – номера исследуемых интервалов, $i=1, 2, \dots, N$;

N_1 – участки поверхности круга, обрабатывающие i -ый интервал, $N_1=1, 2, \dots, N-i+1$;

K – общее количество интервалов, $K = t_{\phi} \cdot 10^3 / \Delta R$;

$F(i\Delta R)$ – значение функции распределения разновысотности зерен;

A_{y_j} – величина смещения оси круга в радиальном направлении, мкм;

$b(y)$ – ширина единичного среза, мкм, толщина которого y мкм;

$k(y)$ – коэффициенты, учитывающие условия контактирования.

Значение функции распределения разновысотности $F(i\Delta R)$ определяется следующим образом:

$$F(\Delta R) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left(\frac{\Delta R}{\beta}\right)^{\alpha}\right), & i = 1; \\ \exp\left(-\left(\frac{(i-1)\Delta R}{\beta}\right)^{\alpha}\right) - \exp\left(-\left(\frac{i\Delta R}{\beta}\right)^{\alpha}\right), & i \geq 2. \end{cases}$$

Величина смещения оси круга в радиальном направлении определяется по формуле

$$A_{y_j} = A \sin \frac{2\pi f R_{\kappa}}{1000 v_{\kappa}} \varepsilon_j,$$

где ε_j – центральный угол, соответствующий участку РПК, обрабатываемому j -ый интервал:

$$\varepsilon_j = \frac{(\sqrt{j} - \sqrt{j-1}) \sqrt{2R_{\kappa} \Delta R \cdot 10^{-3}}}{R_{\kappa}} \cdot \frac{60 v_{\kappa}}{v_{\partial}}.$$

Ширина среза $b(y)$ определяется в зависимости от величины заглубления зерна:

$$b(y) = \begin{cases} 2\sqrt{2\rho y - y^2}, & \text{если } y \leq \rho \left(1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}\right); \\ 2 \left(\rho \frac{1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}}{\cos \frac{\varepsilon}{2}} + y \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \right), & \text{если } y \leq \rho \left(1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}\right). \end{cases}$$

Коэффициенты $k(y)$, учитывающие условия контактирования, определяются следующим образом: $k(y)=0$, если $y \leq 0$, и $k(y)=1$, если $y > 0$.

При расчете режимов обработки, обеспечивающие максимальную высоту неровностей профиля R_{max} , в случае отсутствия радиальных колебаний шлифовального круга перекрытие срезов должно произойти на интервале $N = R_{max} / \Delta R$.

Соотношение (1) примет вид

$$\frac{60v_k}{v_d s_{zn}^2} \sqrt{2R_k \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}} \cdot 2 \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^{N-i+1} (\sqrt{N_1+i-1} - \sqrt{N_1+i-2}) b(N_1\Delta R) \geq 10^3,$$

откуда

$$\frac{60v_k}{v_d} \geq \frac{s_{zn}^2 \cdot 10^3}{2\sqrt{2R_k \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}} \cdot \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^{N-i+1} (\sqrt{N_1+i-1} - \sqrt{N_1+i-2}) b(N_1\Delta R)},$$

где i – номера исследуемых интервалов, $i=1, 2, \dots, N$; N_1 – участки поверхности круга, обрабатывающие i -ый интервал, $N_1=1, 2, \dots, N-i+1$.

Отношение $60v_k/v_d$, найденное по формуле

$$\frac{60v_k}{v_d} = \frac{s_{zn}^2 \cdot 10^3}{2\sqrt{2R_k \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}} \cdot \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^{N-i+1} (\sqrt{N_1+i-1} - \sqrt{N_1+i-2}) b(N_1\Delta R)},$$

является минимально допустимым и обеспечивает требуемую максимальную высоту неровностей профиля R_{max} .

Преобразовать неравенство (1) для решения обратной задачи в случае наличия радиальных колебаний шлифовального круга не представляется возможным, так как отношение $60v_k/v_d$ входит в (1) в неявной форме. Поэтому расчет режимов по заданным параметрам шероховатости выполняется по неравенству (1) методом последовательного перебора вариантов значений скорости детали v_d до момента, пока расчетное значение параметра шероховатости не превысит наперед заданного. Найденное отношение $60v_k/v_d$ является минимально допустимым и обеспечивает требуемую максимальную высоту неровностей профиля R_{max} (или высоту микронеровностей R_z).

Для повышения точности расчета необходимо уменьшить величину интервала ΔR , что приводит к увеличению числа интервалов и усложнению вычислений. Поэтому, для определения режимов алмазного шлифования, обеспечивающих заданную максимальную высоту неровностей профиля R_{max} (или высоту микронеровностей R_z) обработанной поверхности, нами предложена программа расчета на ПЭВМ [4].

Проведенные нами исследования рельефа алмазных кругов [5] позволили установить, что рельеф, сформированный после электроэрозионной правки, отличается хорошим выступанием зерен из связки и повышенными режущими свойствами, что позволяет увеличить скорость детали, а, следовательно, и производительность, и принять за ограничивающую скорость детали скорость, обеспечивающую заданные параметры шероховатости при известных параметрах радиальных колебаний (табл. 1).

Параметры радиальных колебаний круга в процессе шлифования, измерялись при помощи анализатора спектра вибрации модели 795М по методике, описанной нами в [6], и для данных условий обработки составили: $f = 37$ Гц; $A = 0,9$ мкм.

Таблица 1

Продольная скорость стола (скорость детали) шлифовального станка модели 3Д711АФ11, обеспечивающая заданные параметры шероховатости $v_k = 30$ м/с; $f = 37$ Гц; $A = 0,9$ мкм

Заданные параметры шероховатости		Продольная скорость стола, м/мин	
R_z , мкм	R_a , мкм	$\Delta R = 1$ мкм	$\Delta R = 0,5$ мкм
Шлифовальный круг АС6 100/80 – 4 – М2 - 01			
8,0	2,0	30,0	30,0
6,3	1,6	22,8	24,3
5,0	1,0	14,5	15,3
4,0	0,8	6,7	8,3
3,2	0,63	6,0	3,9
2,5	0,50	3,7	2,8
2,0	0,40	2,4	2,6
Шлифовальный круг АС6 160/125 – 4 – М2 - 01			
10,0	2,5	25,0	22,5
8,0	2	15,5	14,0
6,3	1,6	7,2	8,1
5,0	1,0	4,6	3,7
4,0	0,8	2,6	2,2
3,2	0,63	2,0	2,1
2,5	0,50	1,0	1,1
Шлифовальный круг АС6 250/200 – 4 – М2 - 01			
10,0	2,5	20,7	21,1
8,0	2	13,3	13,7
6,3	1,6	9,4	8,1
5,0	1,0	5,9	4,4
4,0	0,8	3,3	2,9
3,2	0,63	2,6	2,3
2,5	0,50	1,2	1,4

Корректность методики расчета продольной скорости стола, обеспечивающей требуемые параметры шероховатости обработанной поверхности, подтверждена экспериментом, в ходе которого шероховатость обработанной поверхности оценивали средним арифметическим отклонением профиля R_a , который определяли на профилометре модели 206 по десяти измерениям.

Исследование влияния отношения скорости круга v_k к скорости детали v_d на параметры шлифованной поверхности было проведено нами экспериментально и теоретически.

Опыты проводились на плоскошлифовальном станке модели 3Д711Ф11. Обрабатывались образцы из стали Р6М5Ф3 кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 160/125-4-М2-01. Шероховатость обработанной поверхности оценивали наибольшей высотой неровностей профиля R_{max} , высотой неровностей профиля по десяти точкам R_z , средним арифметическим отклонением профиля R_a , опорной длиной профиля η_{50} на уровне 50 % R_{max} , относительной опорной длиной профиля t_{50} и средним шагом неровностей профиля по вершинам s . Параметры шероховатости определяли с помощью профилометра-профилографа модели 201, включенного в регистрирующий блок, состоящий из ПЭВМ, оснащенной аналогово-цифровым преобразователем и дисплеем. Профилограмму записывали на ПК при помощи специально разработанного устройства, позволяющего производить запись с постоянной линейной скоростью движения исследуемой поверхности. Общий вид комплекса для записи профилограммы обработанной поверхности на ПЭВМ представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Общий вид комплекса для записи профилограммы обработанной поверхности на ПЭВМ

Профилограф-профилометр «Калибр» модели 201 в его комплектности обладает тем недостатком, что запись профилограмм производится на профилографическую бумагу, вследствие чего обработка профилограмм выполняется вручную и отличается высокой трудоемкостью. Запись профилограммы на ПК позволяет автоматизировать процесс обработки. Нами разработана программа обработки на ПК участков профилограммы базовой длины с целью определения параметров шероховатости. Обработку записанных профилограмм осуществляли по методике ГОСТ 27964-88. Теоретический расчет параметров шероховатости выполняли на ПЭВМ по разработанной нами программе.

Влияние отношения скорости круга к скорости детали на параметры шероховатости R_{max} , R_z , R_a и η_{50} по данным расчета показано на рисунке 2.

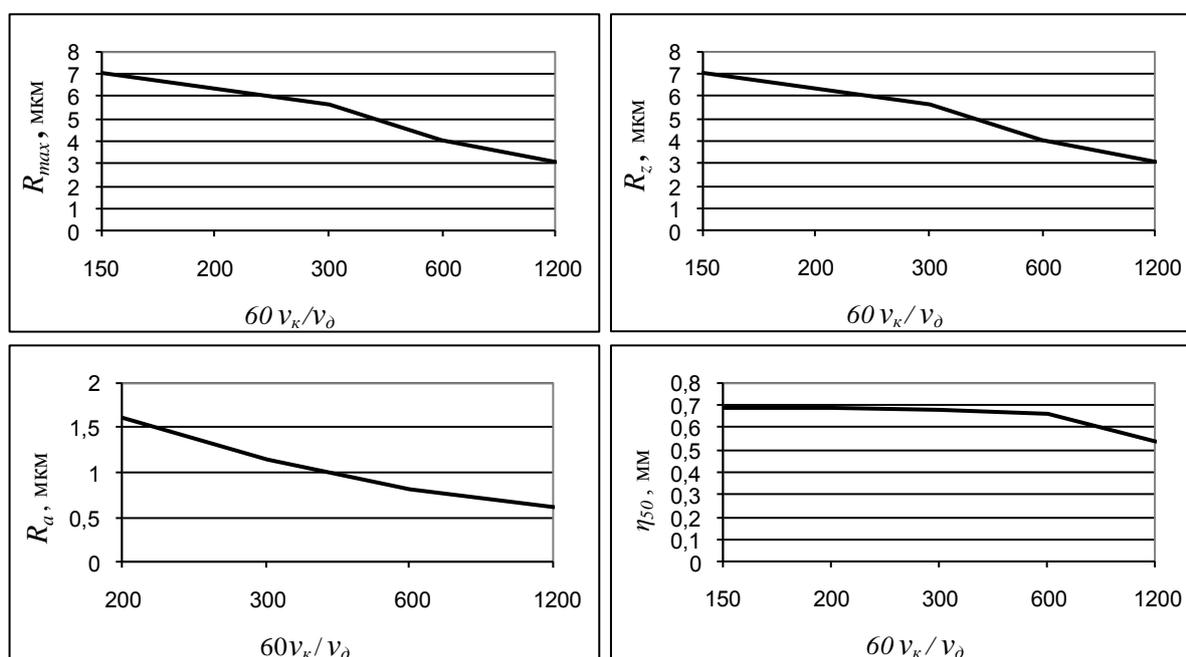


Рисунок 2. Влияние отношения скорости круга к скорости детали на параметры шероховатости шлифованной поверхности по данным расчета

Увеличение отношения $60v_k/v_d$ приводит к уменьшению R_{max} , R_z и R_a (см. рис. 2), причем для исследованных режимов параметр R_a находится в пределах 0,63...1,25, параметр R_z – в пределах 3,2...6,3, а при больших значениях $60v_k/v_d$ пределы R_a – 0,32...0,63, R_z – 1,6...3,2. Уменьшение высоты неровностей профиля объясняется тем, что увеличение отношения скорости круга к скорости детали увеличивает площадь участка поверхности круга, зерна которого участвуют в формировании профиля детали. Таким образом, в формировании поверхности участвует большее количество алмазных зерен. Одновременно часть зерен, расположенных ближе к центру круга, начинает срезать запытообразные срезы, производя радиальный сьем материала. Это также приводит к уменьшению высоты неровностей.

Опорная длина профиля на уровне 50 % при изменении $60v_k/v_d$ от 150 до 1200 практически сохраняет свое значение (см. рис. 2). Это объясняется тем, что изменение R_a не выходит за пределы, когда необходимо изменять базовую длину профиля. Во всех случаях она была равна 0,8 мм. Поэтому, несмотря на то, что высота неровностей уменьшается и увеличивается количество царапин, их ширина уменьшается, что приводит к стабилизации опорной длины.

Экспериментальные данные полностью подтверждают теоретические расчеты, дают аналогичную качественную картину влияния скорости круга и детали на параметры шлифованной поверхности.

Таким образом, предложенная нами методика расчета комплекса параметров шероховатости шлифованной поверхности, учитывающая влияние на них радиальных колебаний РПК, обусловленных колебаниями оси вращения шпинделя со шлифовальным кругом, позволяет определять режимы обработки, обеспечивающие заданные параметры шероховатости.

Список литературы

1. Физико-механическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В 10 т. Т. 6. Качество обработки деталей машин / Под общ. ред. Ф.В. Новикова, А.В. Якимова. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 716 с.

2. Азарова Н.В. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности с учетом радиальных колебаний рабочей поверхности круга / Н.В. Азарова, П.Г. Матюха // Сверхтвердые материалы. – 2006. – № 3. – С. 52-61.

3. Шероховатость поверхности. Термины и определения: ГОСТ 25142-82 (СТ СЭВ 1156-78). – [Введен с 1983-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 20 с.

4. Азарова Н.В. Расчет режимов алмазного шлифования по заданной шероховатости обработанной поверхности / Н.В. Азарова // Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія: Машинобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ. – 2010. – Вип. 111. – С. 3-6.

5. Азарова Н.В. Влияние способа правки алмазного круга на характеристики его рабочей поверхности / Н.В. Азарова, П.Г. Матюха // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ. – 2007. – Вип. 4. – С. 16-20.

6. Азарова Н.В. Экспериментальное определение параметров радиальных колебаний шлифовального круга, сопровождающих процесс обработки / Н.В. Азарова, В.А. Сидоров, В.П. Цокур // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2011. – №. 28. – С. 189-193.

УДК 621.923

Азарова Н.В. Вибір режимів шліфування, які забезпечують задані параметри шорсткості поверхні.

Запропоновано програму для визначення на ПЕОМ режимів плоского алмазного шліфування, які забезпечують задані параметри шорсткості обробленої поверхні, з урахуванням радіальних коливань шліфувального круга.

Ключові слова: алмазне шліфування, шорсткість поверхні, режими обробки.

Іл. 2, список літ. – 6 назв.

УДК 621.923

Азарова Н.В. Выбор режимов шлифования, обеспечивающих заданные параметры шероховатости поверхности.

Предложена программа для определения на ПЭВМ режимов плоского алмазного шлифования, обеспечивающих заданные параметры шероховатости обработанной поверхности, с учетом радиальных колебаний шлифовального круга.

Ключевые слова: алмазное шлифование, шероховатость поверхности, режимы обработки.

Ил. 2, список лит. – 6 назв.

УДК 621.923

Azarova N.V. The calculation of the mechanical conditions, providing required parameter of roughness of the grinded surface.

The program for the determination by PC the mechanical conditions of the flat infeed grinding, providing required parameter of roughness of the machined surface, taking into account the radial vibrations of grinding wheel is produced.

Keywords: diamond grinding, roughness of surface, mechanical conditions.

Ill. 2, literature – 6 title.