

УДК 621.922.025

DOI:10.30987/2223-4608-2021-5-14-18

В.Г. Гусев, д.т.н., **Е.В. Соболева**, аспирант
(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)
E-mail: elizaweta.kalinowsckaya@yandex.ru

Влияние отношения высот кругов в комбинированном инструменте на шероховатость шлифованной поверхности

Рассмотрено влияние отношения высот мелкозернистого и крупнозернистого шлифовальных кругов, входящих в состав комбинированного инструмента, на шероховатость обработанной поверхности. Построены графики зависимости среднего арифметического отклонения профиля шлифованной поверхности в функции независимых факторов процесса. На основе проведенного многофакторного эксперимента выявлено отношение высот указанных шлифовальных кругов, обеспечивающее минимальное значение микрогеометрии обработанной поверхности.

Ключевые слова: комбинированное шлифование; высота круга; крупно- и мелко-зернистый круг; многофакторная модель; шероховатость поверхности.

V.G. Gusev, Dr. Sc. Tech., **E.V. Sobolkova**, Post graduate student
(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

Disk height ratio impact in combined tool upon roughness of ground surface

The impact of the height ratio of fine-grain abrasive disks and coarse grinding ones included in a combined tool upon roughness of the surface ground is considered. There are drawn dependence diagrams of the arithmetic mean deviation of the ground surface profile in the function of independent factors of the process. On the basis of the multi-factor experiment carried out there is defined a ratio of heights of grinding disks mentioned ensuring a minimum value of the micro-geometry of the surface worked.

Keywords: combined grinding; disk height; fine-grain and coarse grinding disk; multi-factor model; surface roughness.

Шлифование занимает ведущее место в финишной обработке материалов. Данный процесс постоянно совершенствуется, разрабатываются новые способы и инструменты, позволяющие существенно повысить качество обработанной поверхности [1, 2], а также оптимизировать процесс, с целью повышения производительности технологических операций [3]. В РФ и за рубежом разрабатываются новейшие конструкции дискретных [4 – 6], текстурированных [7], высокопористых и других шлифовальных кругов, а также проводятся исследования и процессов комбинированной обработки. Данный способ шлифования позволяет существенно повысить производительность технологической операции путем

одновременного выполнения предварительной и окончательной обработки на одном шлифовальном станке с использованием одного инструмента без замены крупнозернистого на мелкозернистый круг [8 – 10].

Комбинированный шлифовальный инструмент включает круги с различными характеристиками абразивного материала. Шлифование проводят крупнозернистым и мелкозернистым кругами, при этом первый из них выполняет предварительную обработку, его располагают между передней опорой шпинделя шлифовального станка и мелкозернистым кругом, а второй – окончательную обработку с расположением его перед крупнозернистым кругом [11].

Эффективность комбинированного шлифования определяется состоянием поверхностного слоя детали после завершения обработки мелкозернистым кругом и, в первую очередь, микрогеометрией поверхности. В этой связи проведены многофакторные экспериментальные исследования среднего арифметического отклонения поверхности, шлифованной комбинированным инструментом, при различном сочетании высот крупнозернистого и мелкозернистого кругов и различных режимах резания. Эксперименты проведены для трех комбинаций шлифовальных кругов.

В эксперименте №1 использовали сплошной крупнозернистый круг ПП (круг плоского профиля) $D \times B \times d$ (наружный диаметр (диаметр режущей поверхности), высота и диаметр посадочного отверстия круга, соответственно) $250 \times 20 \times 76$ мм и сплошной мелкозернистый круг ПП $250 \times 10 \times 76$ мм; в эксперименте №2 – сплошной крупнозернистый круг ПП $250 \times 13 \times 76$ мм и сплошной мелкозернистый круг ПП $250 \times 16 \times 76$ мм; в эксперименте №3 – сплошной крупнозернистый круг ПП $250 \times 10 \times 76$ мм и сплошной мелкозернистый круг ПП $250 \times 20 \times 76$ мм.

Зернистость круга для предварительной обработки F46-40, для окончательной – F90; абразивный материал – электрокорунд белый; связка – керамическая. Между шлифовальными кругами устанавливалась прокладка толщиной $h = 2$ мм. Общая высота комбинированного инструмента в соответствии с технической характеристикой шлифовального станка ЗГ71М, на котором проведены эксперименты, не превышала $B = 32$ мм. В качестве заготовок использовали пластины, обрабатываемый материал – сталь конструкционная легированная марки 30ХГСА. Шероховатость

шлифованной поверхности измеряли на профилемере модели SJ-201P (Япония).

Для выявления наиболее эффективного сочетания шлифовальных кругов в комбинированном инструменте спланирован и реализован многофакторный эксперимент, результаты которого подвергли статистической обработке. В качестве параметра оптимизации выбрано среднее арифметическое отклонение профиля Ra шлифованной поверхности, а в качестве независимых факторов комбинированного шлифования приняты припуск на проход t (код x_1), продольная S_{pr} (x_2) и поперечная S_p (x_3) подачи заготовок. Согласно технологическим возможностям шлифовального станка ЗГ71М и особенностям технологического процесса уровни и интервалы варьирования независимых факторов назначены в соответствии с табл. 1.

1. Уровни и интервалы варьирования независимых факторов процесса комбинированного шлифования

Факторы	Припуск на проход t , мм	Продольная подача S_{pr} , м/мин	Поперечная подача S_p , мм/2х
Код	x_1	x_2	x_3
Интервал варьирования	0,005	5	2
Верхний уровень	0,015	14	6
Основной уровень	0,010	9	4
Нижний уровень	0,005	4	2

Матрица планирования многофакторного эксперимента №1 и его результаты представлены в табл. 2.

2. Матрица планирования и результаты эксперимента №1

Последовательность проведения опытов	Факторы и эффекты взаимодействия							Параметр оптимизации R_{max} , мкм			
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_1	y_2	y_3	\bar{y}
6	+	+	+	+	+	+	+	0,66	0,70	0,53	0,63
3	+	-	+	+	-	-	+	0,57	0,59	0,58	0,58
4	+	+	-	+	-	+	-	0,43	0,50	0,42	0,45
7	+	-	-	+	+	-	-	0,24	0,35	0,33	0,31
1	+	+	+	-	+	-	-	0,43	0,63	0,55	0,54
5	+	-	+	-	-	+	-	0,42	0,46	0,47	0,45
2	+	+	-	-	-	-	+	0,23	0,24	0,21	0,23
8	+	-	-	-	+	+	+	0,20	0,21	0,15	0,19

Примечания: y_1, y_2, y_3 – значения параметра оптимизации в трех параллельных опытах; \bar{y} – среднее арифметическое значение параметра оптимизации по трем параллельным опытам.

Чтобы избежать влияния случайных факторов, проводили рандомизацию последовательности выполнения опытов с использованием пакета Matlab. В результате статистической обработки данных эксперимента №1 (см. табл. 2) получено уравнение регрессии в кодовом обозначении независимых факторов в виде:

$$y = 0,4225 + 0,040x_1 + 0,1275x_2 + 0,07x_3. (1)$$

После проверки адекватности полученной модели с помощью критерия Фишера выполнили переход от уравнения регрессии в кодовом обозначении к уравнению в натуральном обозначении факторов. В результате получили модель в виде:

$$Ra = -0,027 + 8t + 0,0255S_{pr} + 0,035S_p. (2)$$

Зависимости шероховатости шлифованной поверхности в функции толщины снимаемого припуска при верхнем, основном и нижнем уровнях продольной S_{pr} и поперечной S_p подачи соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,54 + 8t; & Ra &= 0,3425 + 8t; \\ Ra &= 0,145 + 8t. \end{aligned} (3)$$

Зависимости шероховатости шлифованной поверхности в функции продольной подачи при верхнем, основном и нижнем уровнях поперечной подачи S_p и толщины снимаемого припуска t соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,3 + 0,026S_{pr}; & Ra &= 0,19 + 0,026S_{pr}; \\ Ra &= 0,083 + 0,026S_{pr}. \end{aligned} (4)$$

Зависимости шероховатости шлифованной поверхности в функции поперечной подачи при верхнем, основном и нижнем уровнях продольной подачи S_{pr} и толщины снимаемого припуска t соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,45 + 0,035S_p; & Ra &= 0,28 + 0,035S_p; \\ Ra &= 0,115 + 0,035S_p. \end{aligned} (5)$$

В результате статистической обработки данных эксперимента №2 получено уравнение регрессии в кодовом обозначении независимых факторов в виде:

$$y = 0,3875 + 0,036x_1 + 0,126x_2 + 0,0713x_3. (6)$$

Уравнение в натуральном обозначении факторов имеет вид:

$$Ra = -0,0539 + 0,0252S_{pr} + 0,03565S_p + 7,2t. (7)$$

Зависимости шероховатости шлифованной поверхности в функции толщины снимаемого припуска при верхнем, основном и нижнем уровнях продольной S_{pr} и поперечной S_p подачи соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,51 + 7,2t; & Ra &= 0,32 + 7,2t; \\ Ra &= 0,12 + 7,2t. \end{aligned} (8)$$

Зависимости шероховатости шлифованной поверхности в функции продольной подачи при верхнем, основном и нижнем уровнях поперечной подачи S_p и толщины снимаемого припуска t соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,27 + 0,025S_{pr}; \\ Ra &= 0,16 + 0,025S_{pr}; \\ Ra &= 0,05 + 0,025S_{pr}. \end{aligned} (9)$$

Зависимости шероховатости шлифованной поверхности в функции поперечной подачи при верхнем, основном и нижнем уровнях продольной подачи S_{pr} и толщины снимаемого припуска t соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,41 + 0,036S_p; \\ Ra &= 0,245 + 0,036S_p; \\ Ra &= 0,08 + 0,036S_p. \end{aligned} (10)$$

В результате статистической обработки данных эксперимента №3 получено уравнение регрессии в кодовом обозначении независимых факторов в виде:

$$y = 0,356 + 0,04x_1 + 0,1175x_2 + 0,07x_3. (11)$$

Уравнение в натуральном обозначении факторов имеет вид:

$$Ra = -0,0755 + 8t + 0,0235S_{pr} + 0,035S_p. (12)$$

Зависимости шероховатости шлифованной поверхности в функции толщины снимаемого припуска при верхнем, основном и нижнем уровнях продольной S_{pr} и поперечной S_p подачи соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,4635 + 8t; \\ Ra &= 0,276 + 8t; \\ Ra &= 0,0885 + 8t. \end{aligned} (13)$$

Зависимости шероховатости шлифованной

поверхности в функции продольной подачи при верхнем, основном и нижнем уровнях поперечной подачи S_p и толщины снимаемого припуска t соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,26 + 0,023S_{pr}; \\ Ra &= 0,15 + 0,023S_{pr}; \\ Ra &= 0,04 + 0,023S_{pr}. \end{aligned} \quad (14)$$

Зависимости шероховатости шлифованной поверхности в функции поперечной подачи при верхнем, основном и нижнем уровнях продольной подачи S_{pr} и толщины снимаемого припуска t соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,37 + 0,035S_p; \\ Ra &= 0,22 + 0,035S_p; \\ Ra &= 0,06 + 0,035S_p. \end{aligned} \quad (15)$$

На основании полученных моделей были построены графики зависимостей микрогеометрии шлифованных поверхностей от независимых факторов для верхнего, основного и нижнего уровней (рис. 1).

Графики результатов исследования показывают, что увеличение высоты круга для окончательной обработки и уменьшение высоты круга для предварительной обработки приводит к снижению среднего арифметического отклонения профиля Ra .

В ходе комбинированной обработки круги для предварительного и окончательного шлифования необходимо править, при этом для сокращения вспомогательного времени на технологическую операцию круги необходимо править одновременно. С учетом данного обстоятельства подбирается комбинация высот шлифовальных кругов, период стойкости которых будет приближен друг к другу.

С учетом вышеизложенного для получения наибольшей производительности шлифовального оборудования и обеспечения минимальных показателей шероховатости поверхности необходимо выбрать комбинацию шлифовальных кругов, в которой круг для предварительной обработки имеет размеры $250 \times 10 \times 76$, а круг для окончательной обработки – $250 \times 20 \times 76$.

Из графиков, представленных на рис. 1, видно, что с увеличением толщины снимаемого припуска значение микрогеометрии поверхностей возрастает, что объясняется увеличением глубины рисок, снимаемых режущими абразивными зернами. Более глубокое внедрение абразивных зерен приводит к росту высоты гребешков, остающихся на обработанной поверхности, а следовательно, и среднего арифметического отклонения профиля Ra .

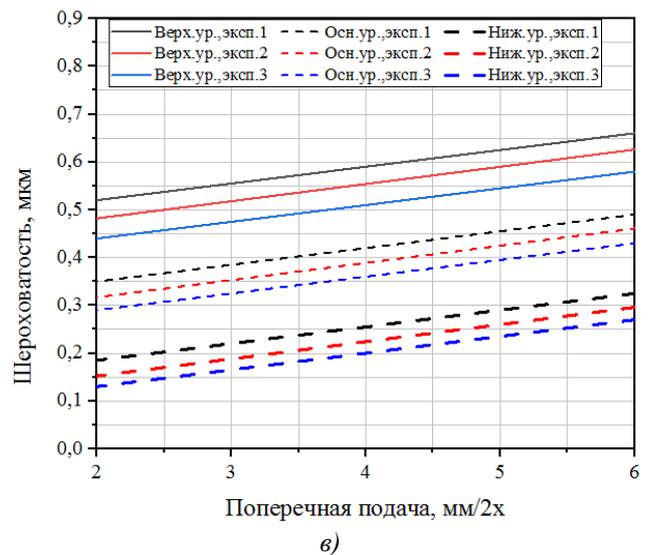
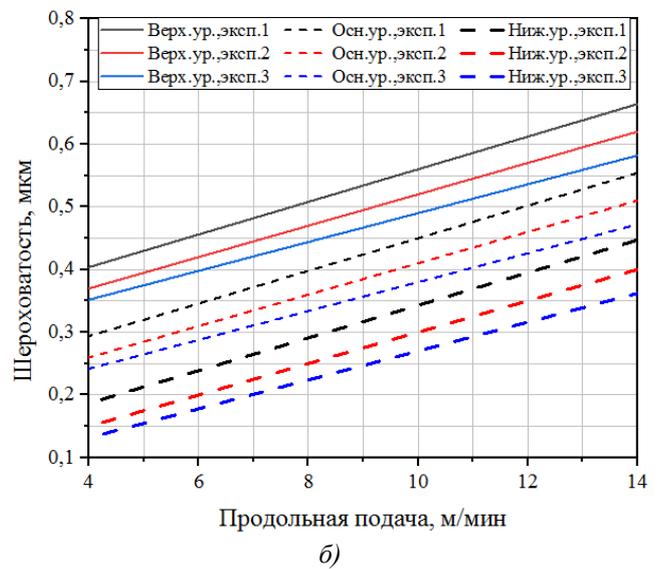
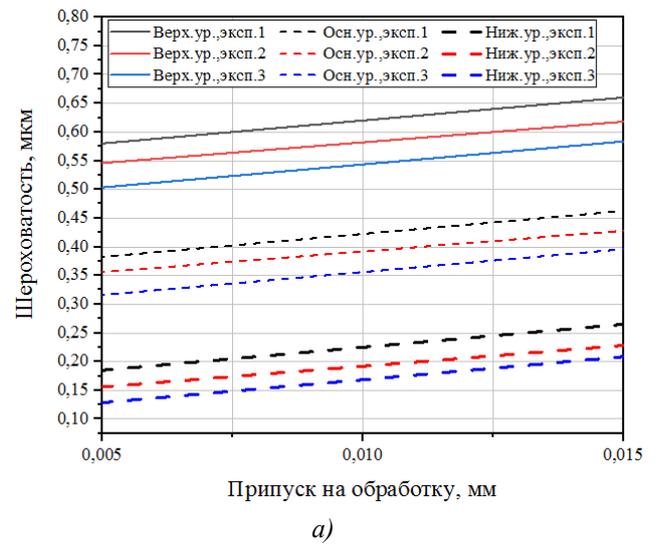


Рис. 1. Зависимость шероховатости при верхнем, основном и нижнем уровнях продольной и поперечной подачи для различных сочетаний высот кругов: а – от припуска на проход; б – от продольной подачи; в – от поперечной подачи

Увеличение продольной и поперечной подачи также приводит к возрастанию шероховатости (см. рис. 1, б, в). Данная закономерность объясняется тем, что с увеличением подачи число встреч зерен шлифовального круга с единичным участком поверхности детали уменьшается, следовательно, сокращается количество неровностей, удаляемых со шлифуемой поверхности, что ведет к возрастанию шероховатости.

Из графиков видно, что углы наклона прямых на рис. 1, б больше углов наклона однотипных прямых, представленных на рис. 1, а, б, в. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что продольная подача в наибольшей степени влияет на среднее арифметическое отклонение профиля Ra . Углы наклона прямых (см. рис. 1, б), отражающих результаты эксперимента №1, больше углов наклона прямых, отражающих результаты экспериментов №2 и №3. Данный факт свидетельствует о том, что с увеличением высоты круга для предварительной обработки влияние продольной подачи на шероховатость поверхности возрастает.

Таким образом, в ходе проведенного исследования установлено влияние отношения высот мелкозернистого и крупнозернистого шлифовальных кругов на шероховатость обработанной поверхности. Доказано, что чем меньше высота круга для предварительной обработки и больше высота круга для окончательной обработки, тем ниже шероховатость.

Полученные уравнения регрессии (1) – (15) и графическая информация, представленная на рис. 1, являются проектной базой для разработки эффективных технологических процессов комбинированного шлифования различных изделий машиностроения при переменном отношении высот крупнозернистого и мелкозернистого шлифовальных кругов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Blurtsyan, D.** Centrifugal Internal Grinding by Assembled Wheel with Radially Mobile Segments. *Mat. Sci. Forum* 874:85–90 Trans Tech. Pub. – Switzerland. – 2016.
2. **Jackson, M.J., Hitchiner, M.P.** High performance grinding and advanced cutting tools. – Springer Pub. House. – 2012.
3. **Rudetskii, A.V., Khudobin, L.V.** Method of supplying coolant in internal grinding. RU Patent 2,359,809, Jun 2009.
4. **Гусев, В.Г., Морозов, А.В.** Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография. - Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с. – ISBN 978-5-905371-38-7.
5. **Пат. № 2385216** Российская Федерация, B24D, 7/00. Дискретный шлифовальный инструмент / Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С.; опубл. 2010. Бюл. № 9.
6. **Морозов, А.В., Гусев, В.Г.** Дискретное плоское тор-

цовое шлифование: монография. – М.: Изд-во Перо, 2016. – 124 с. – ISBN 978-5-906927-57-6.

7. **Hao Nan Li, Dragos Axinte.** Textured grinding wheels: A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2016.07.001>.

8. **Морозов, А.В., Гусев, В.Г.** Моделирование температуры заготовки, шлифуемой торцовым сплошным и сегментным кругами, в САЕ-комплексе Solid Works // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 11(77). – С. 18-23.

9. **Калиновская, Е.В., Гусев, В.Г.** Исследование температуры поверхностей, шлифуемых одновременно кругами с различной характеристикой // XIII Международная научно-практическая конференция. – Курск. – 2018. – С. 105-107.

10. **Гусев, В.Г., Калиновская, Е.В.** Моделирование температуры обрабатываемой поверхности при комбинированном плоском периферийном шлифовании // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 6 (84). – С. 23-30.

11. **Пат. №2606143** Российская Федерация. B24D5/14, B24B7/02. Способ шлифования // Гусев В.Г., Морозов А.В.; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.

REFERENCES

1. **Blurtsyan, D.** Centrifugal Internal Grinding by Assembled Wheel with Radially Mobile Segments. *Mat. Sci. Forum* 874:85–90 Trans Tech. Pub. – Switzerland. – 2016.
2. **Jackson, M.J., Hitchiner, M.P.** High performance grinding and advanced cutting tools. – Springer Pub. House. – 2012.
3. **Rudetskii, A.V., Khudobin, L.V.** Method of supplying coolant in internal grinding. RU Patent 2,359,809, Jun 2009.
4. **Gusev, V.G., Morozov, A.V.** Flat Peripheral Grinding with Discrete Disks: monograph. – Yoshkar-Ola: Colloquium, 2012. – pp. 222. - ISBN 978 5 905371 38 7.
5. **Pat. No. 2385216** the Russian Federation, B24D, 7/00. *Discrete Grinding Tool* / Gusev, V.G., Morozov, A.V., Shvagirev, P.S.; published: 2010. Bull. No. 9.
6. **Morozov, A.V., Gusev, V.G.** *Discrete flat Face Grinding*: monograph / M.: Pero Publishers, 2016. – pp. 124. - ISBN 978-5-906927-57-6.
7. **Hao Nan Li, Dragos Axinte.** Textured grinding wheels: A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2016.07.001>.
8. **Morozov, A.V., Gusev, V.G.** Temperature Modeling of Billet Ground with Face Solid and Segment Disks in Solid Works CAE-Complex // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No. 11(77). – pp. 18-23.
9. **Kalinovskaya, E.V., Gusev, V.G.** Temperature investigation of surfaces ground simultaneously with disks of different characteristics // *The XIII-th Inter. Scientific-Pract. Conf.* – Kursk. – 2018. – pp. 105-107.
10. **Gusev, V.G., Kalinovskaya, E.V.** Modeling of temperature of surface worked at combined flat peripheral grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No. 6(84). – pp. 23-30.
11. **Pat. No.2606143** the Russian Federation. B24D5/14, B24B7/02. *Grinding Method* // Gusev V.G., Morozov A.V., : published: 10.01.2017. Bull. No. 1.

Рецензент д.т.н.
Владимир Андреевич Кечин