

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 3-8.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 3-8.

Научная статья  
УДК 62-1/-9  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-3-8

## Волнистость плоских поверхностей, шлифованных периферией комбинированного инструмента

Владимир Григорьевич Гусев, д.т.н.  
Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Россия  
prof\_gusev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Рассмотрена волнистость плоских поверхностей, шлифованных комбинированным инструментом. Установлена её многофакторная экспериментальная модель, на основе которой оперативно назначают режим шлифования, обеспечивающий требуемые значения волнистости.

**Ключевые слова:** шлифование, комбинированный инструмент, волнистость, режим резания, многофакторная модель

**Для цитирования:** Гусев В.Г. Волнистость плоских поверхностей, шлифованных периферией комбинированного инструмента // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 3-8. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-3-8.

Original article

## Waviness of flat surfaces grinded by the periphery of the combined tool

Vladimir G.Gusev  
Stoletovs State University of Vladimir, Vladimir, Russia  
prof\_gusev@mail.ru

**Abstract.** The waviness of flat surfaces plain with a combined tool is considered. Its multifactorial experimental model has been established, on the basis of which a grinding mode is promptly assigned that provides the required waviness values.

**Keywords:** grinding, combined tool, waviness, cutting mode, multi-factor model

**For citation:** Gusev V.G. Waviness of flat surfaces grinded by the periphery of the combined tool. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 3-8. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-3-8.

Волнистость – геометрический показатель качества поверхности детали, определяющий эксплуатационные свойства деталей машин: контактную жёсткость, шум, вибрацию и др. [1]. Формирование макроотклонений и шероховатости поверхностей на операциях механической обработки изучено детально [2]. Вопросы формирования волнистости поверхностей, её прогнозирования исследованы в меньшей степени, что частично связано с отсутствием технических требований к волнистости в рабочих чертежах деталей.

В то же время доказано, что степень влияния волнистости на эксплуатационные свойства деталей достаточно высока [2], в частности, волнистость беговых дорожек колец подшипников является доминирующим фактором, определяющим уровень вибрации работающей подшипниковой опоры.

В результате совершенствования способов механической обработки материалов появляются новые режущие инструменты, например, комбинированные фрезы, зенкеры, шлифовальные круги, которые позволяют повысить

производительность технологических операций. Инструмент для комбинированного шлифования состоит из шлифовальных кругов с различными характеристиками абразивного материала, что позволяет выполнять одновременно предварительную и окончательную обработку заготовок [3].

Крупнозернистый круг располагают между передней опорой шпинделя станка и мелкозернистым кругом, он выполняет предварительную обработку. Мелкозернистый круг выполняет окончательную обработку, он расположен перед крупнозернистым кругом на максимальном расстоянии от передней опоры консольного шпинделя шлифовального станка [3]. Одновременное выполнение предварительного и окончательного шлифования на одном станке без замены крупно- на мелкозернистый круг приводит к уменьшению вспомогательного времени на выполнение технологической операции и повышению производительности процессов обработки [3].

Кроме этого, комбинированные шлифовальные инструменты открывают новые возможности в управлении процессом обработки поверхностей заготовки путем использования дополнительных независимых факторов, отсутствующих в известных процессах шлифования. Так, управлять выходными параметрами процесса комбинированного шлифования можно не только изменением режима резания, характеристики абразивного материала круга, состава смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и способа её подачи, но и различным сочетанием характеристик абразивного материала крупно- и мелкозернистого шлифовальных кругов.

Дополнительными факторами комбинированного шлифования, существенно влияющими на выходные параметры процесса по сравнению с обработкой стандартными кругами, являются также отношение высот мелко- и крупнозернистого кругов [4], величина припуска, снимаемого каждым кругом; размеры и характер расположения текстуры на режущих поверхностях кругов [5]. Сочетание различных

размерных и фазовых характеристик текстур на режущих поверхностях крупно- и мелкозернистого шлифовальных кругов, открывает новые возможности в эффективном управлении температурой обрабатываемой заготовки [6], что позволяет обеспечивать требуемое физико-механическое состояние шлифованного поверхностного слоя изделий.

Использование указанных выше дополнительных факторов управления процессом комбинированного шлифования позволит уменьшить трудовые, финансовые затраты на выполнение технологической операции и повысить геометрические, физико-механические показатели качества обработанного поверхностного слоя изделий.

Для эффективного управления процессом шлифования, обеспечения требуемых показателей качества при минимальных издержках производства необходимы математические модели, связывающие выходные параметры процесса шлифования с независимыми входными факторами. В настоящее время для процессов комбинированного шлифования разработаны модели шероховатости и температуры обработанной поверхности, а для других выходных параметров такие модели пока не установлены.

Целью исследования является определение многофакторной экспериментальной модели волнистости поверхностей, обработанных комбинированным инструментом, на основе которой можно оперативно назначать режим шлифования, обеспечивающий требуемые значения волнистости.

Для достижения поставленной цели реализован полный факторный эксперимент  $N = 2^k = 2^3 = 8$ , где  $k = 3$  – число независимых факторов процесса комбинированного шлифования. Режимы плоского периферийного шлифования комбинированным инструментом заданы значениями верхнего (+) и нижнего (-) уровней независимых факторов (табл. 1): припуска на проход  $t$  (код  $x_1$ ), продольной  $S_{пр}$  ( $x_2$ ), поперечной  $S_{п}$  ( $x_3$ ), подачи заготовки.

#### 1. Уровни и интервалы варьирования независимых факторов процесса комбинированного шлифования

Факторы	Припуск на проход $t$ , мм	Продольная подача $S_{пр}$ , м/мин	Поперечная подача $S_{п}$ , мм/2.х.
Код	$x$		
Интервал варьирования	0,005	5	2
Верхний уровень	0,015	14	6
Основной уровень	0,010	9	4
Нижний уровень	0,005	4	2

Шлифовали при скорости резания 35 м/с конструкционную легированную сталь 30ХГСА, 227...230 НВ на плоскошлифовальном станке мод. ЗГ71М, в качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) использовали 5%-ный водный раствор LACTVCA WBA 5400, расход СОЖ –  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с).

Одновременную предварительную и окончательную обработку опытных образцов реализовали соответственно стандартными шлифовальными кругами ПП 250×20×76 мм, 25AF40L8VA и ПП 250×10×76 мм, 25AF90L8VA. Правку крупно- и мелкозернистого шлифовальных кругов проводили алмазным карандашом типа С при следующем режиме: два черновых прохода при глубине реза-

ния  $t_1 = 0,015$  мм, продольной подаче алмазного карандаша  $S_{пр1} = 250$  мм/мин и один чистойвой проход при  $t_2 = 0,005$ ,  $S_{пр2} = 150$  мм/мин. Частота вращения комбинированного шлифовального круга в процессе правки составляла 2880 мин<sup>-1</sup>.

Значения параметра оптимизации  $Y(H_v)$  обработанной поверхности определяли с использованием профилометра Mitutoyo Formtracer Avant S3000-D. Рандомизацию последовательности проведения опытов во времени, указанную в матрице планирования (табл. 2, столбец «Опыты»), реализовали с использованием компьютерной программы Randstuff.ru/number.

## 2. Матрица планирования и результаты многофакторного эксперимента

Опыты	Независимые факторы				Параметр оптимизации, мкм
					$Y(H_v)$
6	+	+	+	+	5,9
3	+	–	+	+	5,5
4	+	+	–	+	4,1
7	+	–	–	+	3,7
1	+	+	+	–	4,9
5	+	–	+	–	3,2
2	+	+	–	–	2,9
8	+	–	–	–	2,3

В результате статистической обработки данных полного факторного эксперимента получены уравнения регрессии, связывающие параметр оптимизации одновременно с двумя и тремя факторами. При обработке экспериментальных данных использован функционал, обеспечивающий построение 3М-XYZ поверхность-графиков и 3М-XYZ контур-графиков, на основании которых оперативно определяют значения волнистости обработанной поверхности для конкретных режимов шлифования комбинированным инструментом. Интерактивное влияние снимаемого припуска  $t$  и продольной подачи  $S_{пр}$  заготовки на волнистость поверхности  $H_v$ , обработанной комбинированным инструментом, описывается уравнением регрессии:

$$H_v = 1,825 + 77,5t + 0,163S_{пр}. \quad (1)$$

Графическая интерпретация уравнения (1) представлена на рис. 1, где справа от цветовой области поверхности отклика изображен столбец, включающий цветные прямоугольники с числами, отражающими значения волнистости шлифованной комбинированным кругом поверхности.

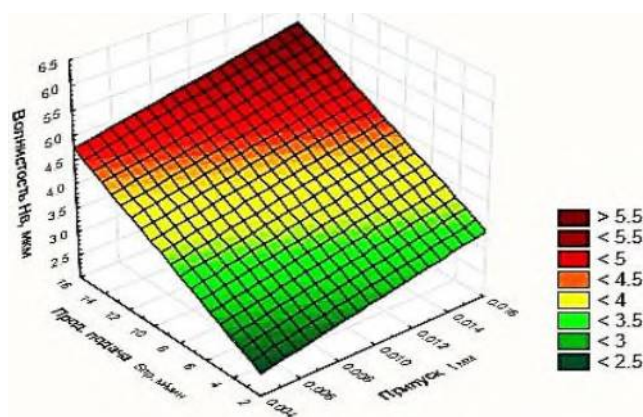


Рис. 1. 3М-XYZ поверхность-график интерактивного влияния снимаемого припуска и продольной подачи заготовки на волнистость поверхности, обработанной комбинированным инструментом

Например, прямоугольнику желтого цвета соответствуют значения волнистости меньше 4 мкм, такие же её значения соответствуют желтой области поверхности отклика, что позволяет оперативно определять элементы режима шлифования, обеспечивающие волнистость менее 4 мкм. Аналогично можно оперативно определять режим шлифования, обеспе-

чивающий значение волнистости, заданное чертежом детали.

3М-XYZ контур-график интерактивного влияния снимаемого припуска и продольной подачи заготовки на волнистость поверхности, шлифованной комбинированным инструментом (рис. 2), содержит также области, отличающиеся цветом и ограниченные ломаными прямыми линиями, что также ускоряет определение параметра оптимизации для конкретных значений элементов режима резания.

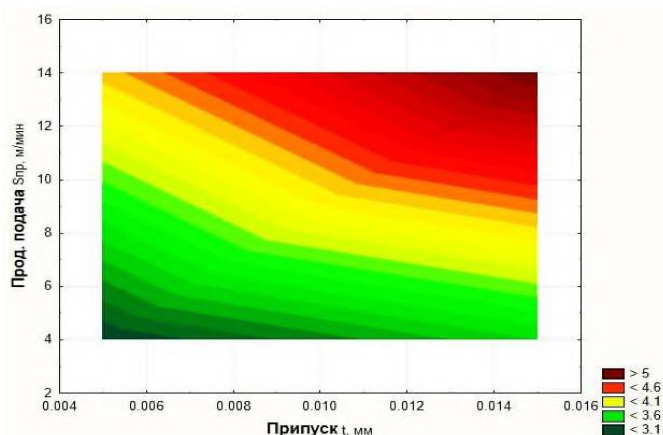


Рис. 2. 3М-XYZ контур-график интерактивного влияния снимаемого припуска и продольной подачи заготовки на волнистость поверхности, обработанной комбинированным инструментом

Интерактивное влияние снимаемого припуска и поперечной подачи заготовки описывается уравнением регрессии:

$$H_B = 1,813 + 77,5t + 0,369S_{пр}. \quad (2)$$

Графическая интерпретация уравнения (2) представлена на рис. 3.

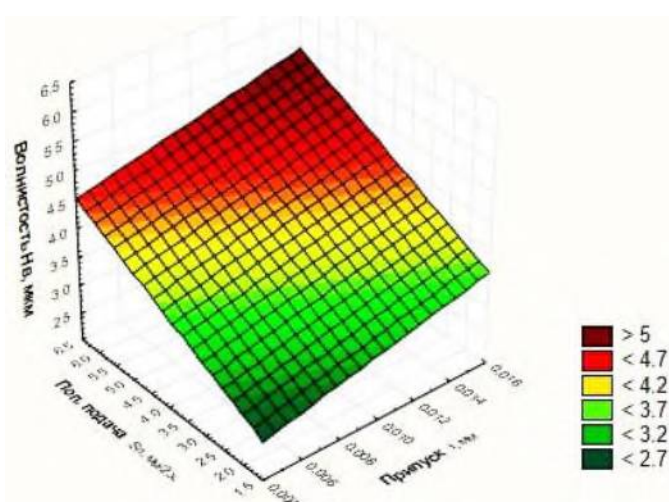


Рис. 3. 3М-XYZ поверхность-график интерактивного влияния снимаемого припуска и поперечной подачи заготовки на волнистость поверхности, обработанной комбинированным инструментом

3М-XYZ контур-график интерактивного влияния снимаемого припуска и поперечной подачи заготовки на волнистость обработанной поверхности представлен на рис. 4.

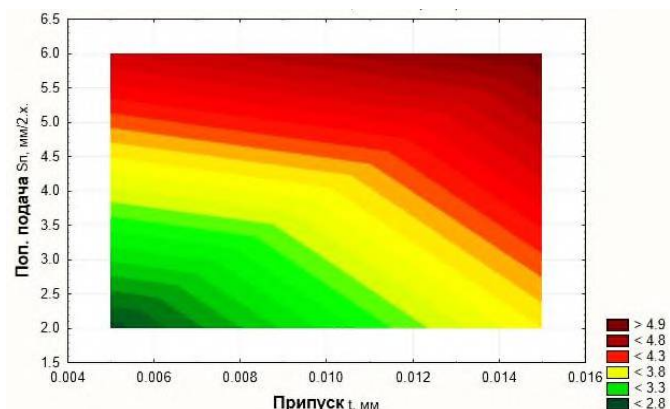


Рис. 4. 3М-XYZ контур-график интерактивного влияния снимаемого припуска и поперечной подачи заготовки на волнистость обработанной поверхности

Интерактивное влияние продольной и поперечной подачи заготовки на волнистость поверхности, обработанной комбинированным шлифовальным инструментом, описывается уравнением регрессии:

$$H_B = 1,125 + 0,163S_{пр} + 0,369S_{п}. \quad (3)$$

Графическая интерпретация уравнения (3) представлена на рис. 5.

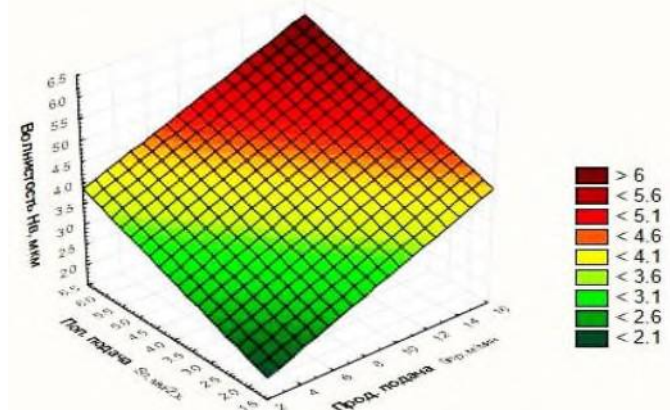


Рис. 5. 3М-XYZ поверхность-график интерактивного влияния продольной и поперечной подачи заготовки на волнистость обработанной поверхности

3М-XYZ контур-график интерактивного влияния продольной и поперечной подачи заготовки на волнистость, представленный на рис. 6, отличается от аналогичных контур-графиков (см. рис. 2, рис. 4) углами наклона прямых, ограничивающих цветовые области поверхности отклика к осям абсцисс и ординат, что вызвано различными коэффициентами, стоящими перед факторами в уравнении регрессии.



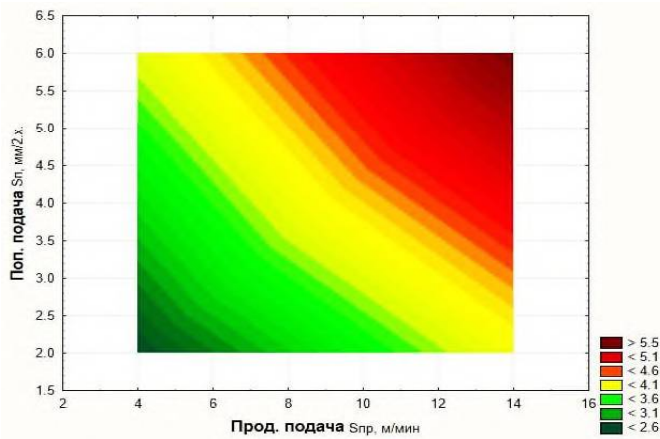


Рис. 6. 3М-XYZ контур-график интерактивного влияния продольной и поперечной подачи заготовки на волнистость обработанной поверхности

Для определения уравнения регрессии, описывающего интерактивное влияние на волнистость поверхности одновременно всех трех независимых факторов, необходимо сначала найти уравнение регрессии в кодовом обозначении факторов, а затем перейти к искомому уравнению регрессии в натуральном их обозначении.

Уравнение регрессии в кодовом обозначении факторов необходимо не только для оценки влияния на параметр оптимизации каждого фактора в отдельности, но и для сравнения факторов между собой по тренду и степени влияния на волнистость.

В результате статистической обработки данных полного факторного эксперимента получено уравнение регрессии в кодовом обозначении всех трех факторов и параметра оптимизации, которое имеет вид:

$$Y = 4,0625 + 0,3875x_1 + 0,8125x_2 + 0,7375x_3, \quad (4)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – кодовые обозначения независимых факторов  $t, S_{пр}$  и  $S_{пн}$  соответственно;  $Y$  – кодовое обозначение параметра оптимизации, т.е. волнистости шлифованной поверхности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бишутин, С.Г., Захаров, Л.А. Обеспечение требуемых параметров качества поверхностного слоя плоских поверхностей при обработке абразивными бруска-

Из (4) следует, что все три фактора при их увеличении вызывают повышение волнистости поверхности. Уравнение регрессии в натуральном обозначении припуска на проход, продольной, поперечной подачи и параметра оптимизации имеет вид:

$$H_B = -0,016 + 77,5t + 0,163S_{пр} + 0,369S_{пн}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что наибольшее влияние на волнистость поверхности, шлифованной комбинированным инструментом, оказывает продольная подача заготовки, за ней по степени влияния следуют поперечная подача и величина припуска, снимаемого за каждый двойной ход рабочего стола с заготовкой.

Совокупность уравнений регрессии (1) - (5), 3М-XYZ поверхность-графиков, 3М XYZ контур-графиков представляет собой многофакторную экспериментальную модель волнистости поверхности, обработанной комбинированным шлифовальным инструментом. Установленная модель волнистости позволяет управлять входными факторами процесса комбинированного шлифования, с целью получения волнистости поверхности, указанной в рабочем чертеже детали. Для управления волнистостью обработанной поверхности в условиях производства рекомендуется использовать уравнение регрессии (5), поскольку в производстве при настройке режима комбинированного шлифования заготовки на конкретном станке используют абсолютные единицы измерения независимых факторов.

Полученные результаты исследований рекомендуются использовать в условиях машиностроительных и других промышленных предприятий, где проектируют и реализуют технологические процессы шлифования ответственных деталей машин.

ми // Контактная жёсткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение: Сб. тр. МНТК. – 2003. – С. 239-242.

2. Витвинов, М.К. Технологическое наследование волнистости на операциях механической обработки на

примере фрезерования и плоского шлифования: Автореф. канд. техн. наук, Барнаул. – 2015. – 18 с.

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

4. Гусев, В.Г., Калиновская, Е.В. Влияние соотношения высот кругов в комбинированном инструменте на шероховатость обработанной поверхности // Научно-ёмкие технологии в машиностроении. – 2021. – №5 (119). – С. 14-18.

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

6. Hao Nan Li, Dragos Axinte Textured grinding wheels: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001).

## REFERENCES

1. Bishutin S.G., Zakharov L.A. Obespechenie trebuemykh parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya ploskikh poverkhnostej pri obrabotke abrazivny mi

bruskami // Kontaktная zhyostkost'. Iznosostojkost'. Tekhnologi-cheskoe obespechenie: Sb. tr. MNTK. 2003. P. 239-242.

2. Bitvinov M.K. Tekhnologicheskoe nasledovanie volnictocti na operacziyah mekhanicheskoy obrabotki na primere frezerovaniya i ploskogo shlifovaniya: Avtoref. ...kand. tekhn. nauk Barnaul, 2015. 18 p.

3. Pat. No 2606143 Rossijskaya Federaciya. B24D5/14, B24B7/02. Sposob shlifovaniya // Gusev V.G., Morozov A.V.; opubl. 10.01.2017. Byul. No 1.

4. Gusev V.G., Kalinovskaya E.V. Vliyanie sootnosheniya vy`sot krugov v kombinirovannom instrumente na sherokhovatost` obrabotannoj poverkhnosti – Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021. No 5 (119). P. 14-18.

5. Gusev V.G., Kalinovskaya E.V. Modelirovanie temperatury` obrabaty`vaemoj poverkhnosti pri kombinirovannom ploskom periferijnom shlifovanii // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2018. No 6 (84). P. 23-30.

6. Hao Nan Li, Dragos Axinte. Textured grinding wheels: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001)

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.08.2022; одобрена после рецензирования 09.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

The article was submitted 12.08.2022; approved after reviewing 09.10.2022; assepted for publication 14.10.2022.

