

УДК 621.923.02

## Исследование статистико-вероятностных характеристик рабочей поверхности шлифовального круга\*

**А.Б. Переладов, И.П. Камкин, А.В. Анохин**

*Создание совершенных методик проектирования операций шлифования в значительной мере сдерживается отсутствием общепринятых адекватных модельных представлений рабочей поверхности шлифовального инструмента. С целью уточнения параметров ее строения выполнено исследование статистических показателей распределения расстояний между вершинами абразивных зерен, расположенных на рабочей поверхности шлифовального круга. При проведении физического эксперимента рабочая поверхность шлифовального круга прокатывалась по алюминиевому образцу, на котором отпечатывались вершины абразивных зерен. Отпечатки фотографировались и полученные изображения обрабатывались на компьютере. Анализ результатов проведенного эксперимента позволил получить новые сведения о виде (нормальное) и статистических показателях распределения исследованного параметра. Результаты исследования используются при разработке более адекватных вероятностных моделей рабочих поверхностей инструмента, методик численного расчета показателей процесса шлифования и, на их основе, систем автоматизированного компьютерного проектирования операций абразивной обработки.*

**Ключевые слова:** шлифовальный круг, рабочая поверхность, статистическое распределение, вершина абразивного зерна.

## Investigation of statistical and probabilistic characteristics of the working surface of a grinding wheel

**A.B. Pereladov, I.P. Kamkin, A.V. Anokhin**

*The development of perfect design techniques for grinding operations is largely constrained by the lack of adequate conventional models of the working surface of a grinding wheel. In order to improve the parameters of the working surface, the statistical distribution of the distances between the tops of abrasive grains on the working surface of a grinding wheel was studied. When conducting a physical experiment, the working surface of the grinding wheel was rolled over an aluminum sample to get abrasive grain prints. The prints were photographed and the obtained images were processed by a computer. The analysis of the experimental*

\*Исследования проводятся в соответствии с контрактом № 11474Р/20982, заключенным с Фондом содействия развитию малых форм предпринимательства в научно-технической сфере.



**ПЕРЕЛАДОВ**  
Александр Борисович  
(Курганский государственный университет)

**PERELADOV**  
Aleksandr Borisovich  
(Kurgan, Russian Federation, Kurgan State University)



**КАМКИН**  
Иван Павлович  
(Курганский государственный университет)

**KAMKIN**  
Ivan Pavlovich  
(Kurgan, Russian Federation, Kurgan State University)



**АНОХИН**  
Андрей Викторович  
(Курганский государственный университет)

**ANOKHIN**  
Andrey Viktorovich  
(Kurgan, Russian Federation, Kurgan State University)

*results provided new information about statistical distribution characteristics of the parameters under study. The results of research will be useful for developing more adequate probabilistic models of the working surface of a grinding wheel, numerical procedures for calculating grinding process parameters, and computer-aided design systems for abrasive machining.*

**Keywords:** grinding wheel, working surface, statistical distribution, top of grain.

Создание методик численного расчета и основанных на них программных средств для автоматизированного проектирования шлифовальных операций в настоящее время является актуальной научно-практической задачей, эффективное решение которой во многом определяется адекватностью модельных представлений строения рабочей поверхности (РП) шлифовального инструмента (ШИ), используемых в процессе исследований и анализа.

Известные модели РП ШИ значительно отличаются друг от друга по ряду параметров [1–10], что можно объяснить различием применяемых подходов, методик исследований, используемых приборов и оборудования. В настоящее время отсутствует единое мнение о характере распределения вершин абразивных зерен (АЗ) в объеме рабочего слоя (РС) инструмента, в пределах которого располагаются все активные зерна, осуществляющие срезание припуска с обрабатываемой заготовки. Распределение вершин зерен по РП многие авторы научных работ при исследовании, например, абразивного инструмента на керамической и органической связках, принимают как равномерное, хорошо описываемое симметричной кривой нормального распределения, что не соответствует данным, полученным другими исследователями. Например, С. Малкин в работе [7] считает возможным образование нескольких режущих кромок у одного зерна, вследствие правки РП инструмента или в процессе его работы. Однако оценка влияния данного фактора и математическое описание распределения зерен в работе автора отсутствуют. Е.Н. Маслов, рассматривая возможные виды изнашивания абразивных зерен, также допускал возможность образования нескольких новых режущих кромок при скалывании вершины зерна.

Аналогичный эффект наблюдался при исследовании РП шлифовального круга (ШК) путем шлифования быстро движущейся ленты [11].

Кроме того, существует еще ряд факторов, которые могут повлиять на неравномерность распределения вершин зерен: вид и качество рассева шлифзерна, его неравномерное смешивание при изготовлении ШК (непромешивание, комкование массы), неравномерное прессование, флуктуация плотности, возникающая в структуре инструмента при его спекании [12], и другие причины.

Таким образом, для оценки и сопоставления известных данных, а также получения дополнительной информации было принято решение о проведении исследований показателей распределения вершин АЗ по поверхности инструмента с учетом реальных условий формирования рельефа РП.

Исследование показателей распределения вершин АЗ осуществлялось путем проведения лабораторного эксперимента с использованием специально изготовленного ШК (тип 1, размеры 250×20×76, статические характеристики 25А F60 J 8 V). При изготовлении ШК контролировались следующие параметры: рассев шлифзерна, плотность и твердость структуры спеченного инструмента. Формовочная масса смешивалась в течение 30 мин в шнековой мешалке емкостью 5 кг, затем просеивалась через сита (ГОСТ 6613) сначала с размером ячеек 1,0 мм, а затем 0,5 мм. В ходе эксперимента ШК устанавливался на шпинделе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ3 и правился алмазным карандашом (тип 3908-0052, исп. А). Параметры режима правки: угловая скорость ШК  $n_{кр} = 2\ 800\ \text{мин}^{-1}$ , глубина правки  $t = 0,02\ \text{мм}$ , скорость поперечной подачи  $S_{пр} = 0,2\ \text{м/мин}$ . Затем правленным кругом осуществлялась обработка закаленного стального образца (сталь Р6М5, 62 HRC) по схеме плоского шлифования с осевой подачей. Параметры режима шлифования:  $n_{кр} = 2\ 800\ \text{мин}^{-1}$ , глубина шлифования  $t = 0,02\ \text{мм}$ , скорость поперечной (осевой) подачи  $S_{поп} = 2\ \text{мм/ход}$ , скорость продольной подачи  $S_{пр} = 8\ \text{м/мин}$ . Сошлифованный в ходе испытаний объем металла составил  $3\ 320\ \text{мм}^3$ . После приработки ШК его рабочая поверхность с ис-

пользованием механизма продольной подачи рабочего стола станка прокатывалась по специально подготовленному образцу (алюминиевая лента толщиной 2 мм, шероховатость поверхности  $R_a = 0,32$  мкм). Глубина прокатывания равнялась 0,02 мм. Затем образец (алюминиевая лента) фотографировался цифровой камерой (матрица 16 Мп) с использованием осветительной системы инструментального микроскопа, состоящей из четырех ортогонально расположенных источников света. Схема прокатывания и полученная фотография участка образца с отпечатками вершин зерен представлены на рис. 1.

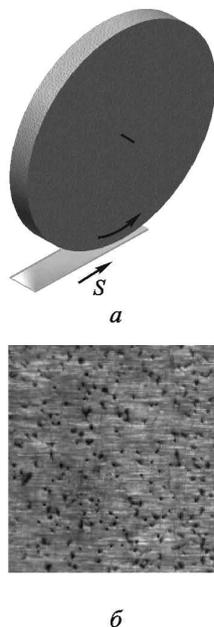


Рис. 1. Схема прокатывания (а) и фотография участка поверхности алюминиевой ленты с отпечатками вершин зерен (б)

Координаты центров отпечатков вершин зерен, необходимых для проведения статистического анализа, определялись следующим образом. Поскольку все полученное цифровое изображение участка образца состоит из элементарных участков — пикселей, координаты центров отпечатков вершин АЗ определялись с использованием координат всех пикселей, образующих изображение каждого отпечатка. Обработка оцифрованного изображения поверхности осуществлялась в программном пакете Mathcad 14. Изображение образца представлялось в оттенках серой шкалы цветовой модели RGB. Отте-

нок цвета каждого пикселя по этой шкале при 8-битной кодировке определяется численными значениями в интервале от 0 (черный цвет) до 255 (белый цвет). Для устранения фонового загрязнения исходного изображения пороговое значение оттенков следов зерен находилось пошаговым подбором с одновременным анализом изображений следов на соответствие с имеющимися отпечатками на образце. Так как следы зерен представлены на изображении более темными участками, к ним были отнесены пиксели, со значениями насыщенности меньшими 101. Изображения отпечатков вершин АЗ после проведенной компьютерной обработки представлены на рис. 2.

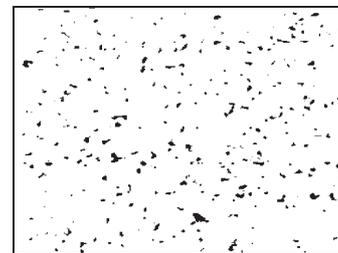


Рис. 2. Обработанное компьютерное изображение участка исследуемой поверхности образца с выделенными отпечатками вершин зерен

Изображения отпечатков образованы группами пикселей, отнесенных алгоритмом обработки изображения к следам зерен. Для определения группы пикселей, формирующих изображение отдельных зерен, использовался стандартный алгоритм заливки изображения с четырьмя соседними пикселями без рекурсии. Координаты отпечатков вершин АЗ на плоскости определялись по формулам

$$x = x_{\min} + \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2};$$

$$y = y_{\min} + \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2},$$

где  $x$  — абсцисса центра отпечатка АЗ;  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$  — соответственно минимальная и максимальная абсцисса отпечатка АЗ;  $y$  — ордината центра отпечатка АЗ;  $y_{\min}$ ,  $y_{\max}$  — соответствующие ординаты отпечатка.

Характер распределения плотности вероятности расстояний между вершинами АЗ определялся по специально разработанному алгоритму программного поиска соседних зерен. Для центра отпечатка каждой вершины АЗ рас-

считывались расстояния до ближайших центров отпечатков других зерен и определялись их средние значения  $L$ . Гистограмма распределения плотности вероятности значений  $L$  изображена на рис. 3.

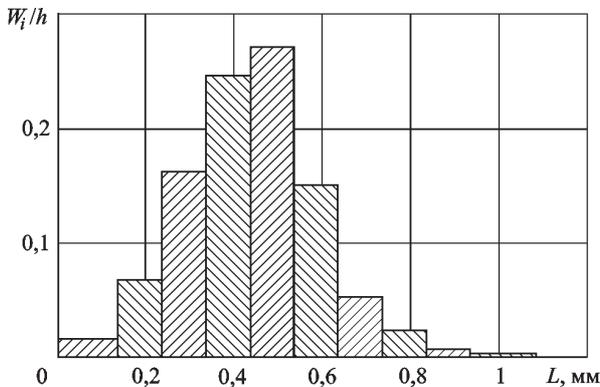


Рис. 3. Гистограмма распределения плотности вероятности среднего значения параметра  $L$

Полученные показатели распределения для параметра  $L$ : математическое ожидание  $\bar{x} = 0,438$  мм, среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 0,149$  мм, дисперсия  $\sigma^2 = 0,022$  мм<sup>2</sup>. Также были определены параметры распределения площадей отпечатков следов АЗ ( $S_3$ ). Площадь каждого отпечатка рассчитывалась по количеству пикселей, отнесенных к конкретному следу АЗ с учетом масштабного коэффициента. Гистограмма распределения  $S_3$  показана на рис. 4. По оси абсцисс отложено значение площадей следов АЗ. Полученные показатели распределения для  $S_3$ : математическое ожидание  $\bar{x} = 0,0095$  мм<sup>2</sup>, среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 0,011$  мм<sup>2</sup>, дисперсия  $\sigma^2 = 1,13 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>4</sup>.

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований статистических па-

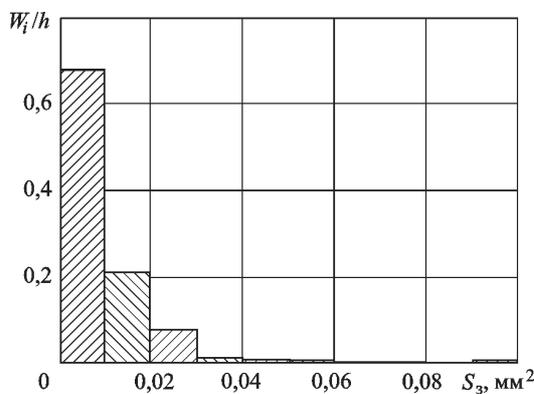


Рис. 4. Гистограмма распределения плотности вероятности параметра  $S_3$

раметров распределения вершин АЗ позволил сделать вывод о наличии правосторонней асимметрии распределения плотности вероятности расстояний между вершинами зерен  $L$ , что свидетельствует о признаках наличия групп дислокаций отпечатков вершин зерен, неравномерно распределенных по плоскости.

## Выводы

1. Выявлена асимметрия распределения плотности вероятности расстояний между вершинами зерен  $L$ , что можно объяснить наличием нескольких вершин у некоторых АЗ [7], образовавшихся в результате их разрушения в процессе правки и/или резания металла при шлифовании, что предопределяет их возможное расположение относительно друг друга на расстоянии меньшем или равном диаметру (длине) зерна.

2. Можно исключить причины асимметрии распределения, связанные с усадкой инструмента при спекании и неравномерностью смешивания формовочной массы, так как объемная усадка ШК практически отсутствовала (составляла 0...0,5% по объему), а равномерность распределения компонентов структуры изготовленного инструмента обеспечивалась продолжительностью смешивания и двукратным просевом формовочной массы.

3. Полученные результаты будут полезны при исследовании процесса шлифования и создании статистико-вероятностных моделей рабочей поверхности шлифовального инструмента [13].

## Литература

- [1] Старков В.К. *Шлифование высокопористыми кругами*. Москва, Машиностроение, 2007. 688 с.
- [2] Dąbrowski L., Marciniak M., Oczko K.E. Cutting surface of the grinding wheel as a component of tribological system. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2002, vol. 2, no. 1–2 URL: <http://www.acme.pwr.wroc.pl/repository/12/online.pdf> (accessed 1 December 2013).
- [3] Иванов В.А., Иванов А.В., Долинин А.А., Халтурин О.А. Математическое моделирование формирования шероховатости поверхности при алмазном хонинговании брусками на металлических связках. *Вестник УГАТУ*, 2011, т. 15, № 2(42), с. 82–87.
- [4] Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. *3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования*. Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. 364 с.
- [5] Янкин И.Н., Кисметов Ю.В. Компьютерная модель процесса шлифования. *Вестник СГТУ*, 2009, т. 1, № 2, с. 66–71.
- [6] Носенко В.А., Даниленко М.В., Шевцова Е.В. Математическая модель рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании. *Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф.*, 13–18 сентября 2010 г. В 4 т. Донецк, ДонНТУ, 2010, т. 2, с. 233–237.

[7] Malkin S., Guo Ch. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York, Industrial Press Inc., 2008, 372 p.

[8] Бабошкин А.Ф. Моделирование рабочей поверхности абразивных лент набором тел геометрически правильной формы. *Прогрессивные технологии в машиностроении Межвуз. сб. науч. тр.* Волгоград, РПК Политехник, 2002, вып. 5, с. 15–18.

[9] Гисметулин А.Р., Сидоренко О.М. Моделирование формообразования шероховатости поверхности на операции плоского шлифования. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012, т. 14, №4(3), с. 24–34.

[10] Федотов Е.В. Разработка вероятностно-статистической модели распределения зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании с учетом разновидностей изнашивания: Дис. ... канд. техн. наук. Волгоград: Волгоградский гос. техн. ун-т, 2007. 158 с.

[11] Переладов А.Б., Камкин И.П. Вероятностная компьютерная модель рабочего слоя шлифовального круга. *Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении*, 2013, № 20(123), с. 49–52.

[12] Рябцев С.А. Изготовление высокоструктурного абразивного инструмента. *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2008, № 2, с. 24–31.

[13] Переладов А.Б., Камкин И.П. Моделирование процесса шлифования с использованием программного комплекса T-Flex. *Зуральский научный вестник*, 2013, №1(3), с. 30–33.

## References

[1] Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Highly porous grinding wheels]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007. 688 p.

[2] Dąbrowski L., Marciniak M., Oczóś K.E. Cutting surface of the grinding wheel as a component of tribological system. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2002, vol. 2, no. 1–2. Available at: <http://www.acme.pwr.wroc.pl/repository/12/online.pdf> (accessed 1 December 2013).

[3] Ivanov V.A., Ivanov A.V., Dolinin A.A., Khalturin O.A. Matematicheskoe modelirovanie formirovaniia sherokhovatosti poverkhnosti pri almaznom khoningovanii bruskami na metallicheskikh sviazkakh [Mathematical modeling of the formation of surface roughness in diamond honing bars metal bond]. *Vestnik UGATU* [Herald USATU]. 2011, vol. 15, no. 2(42), pp. 82–87.

[4] Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Fedorovich V.A. *3D modelirovanie almazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shlifovaniia* [3D modeling of diamond abrasive tools and grinding processes]. Khar'kov, NTU «KhPI» publ., 2006. 364 p.

[5] Iankin I.N., Kismetov Iu.V. Komp'yuternaia model' protsessa shlifovaniia [Computer model of grinding process]. *Vestnik SGTU* [Vestnik SSTU]. 2009, vol. 1, no. 2, pp. 66–71.

[6] Nosenko V.A., Danilenko M.V., Shevtsova E.V. *Matematicheskaiia model' rabochei poverkhnosti abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii* [Mathematical model of the working surface of the abrasive tool for grinding]. *17 Mezhdunarodnaia nauchno-tekhniicheskaia konferentsiia «Mashinostroenie i tekhnosfera 21 veka»* [17 International Scientific Conference «Engineering and Technosphere of the XXI Century»]. In 4 vol. Donetsk, DNTU publ., 2010, vol. 2, pp. 233–237.

[7] Malkin S., Guo Ch. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York, Industrial Press Inc., 2008. 372 p.

[8] Baboshkin A.F. *Modelirovanie rabochei poverkhnosti abrazivnykh lent naborom tel geometricheski pravil'noi formy* [Modelling work surface abrasive belts set of bodies geometrically regular shape]. *Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Advanced technologies in engineering Interuniversity collection of scientific papers]. Volgograd, RPK Politehnik publ., 2002, issue 5, pp. 15–18.

[9] Gismetulin A.R., Sidorenko O.M. Simulation of forming operations surface roughness on surface grinding. *Proceedings of the Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences*. 2012, vol. 14, no. 4(3), pp. 850–855.

[10] Fedotov E.V. *Razrabotka veroiatnostno-statisticheskoi modeli raspredeleniia zeren na rabochei poverkhnosti abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii s uchetom raznovidnostei iznashivaniia*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of probabilistic and statistical models of distribution of grains on the working surface of the abrasive tool for grinding considering varieties wear. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Volgograd, 2007. 158 p.

[11] Pereladov A.B., Kamkin I.P. Veroiatnostnaia komp'yuternaia model' rabocheho sloia shlifoval'nogo kruga [Probabilistic computer model of the working layer of the grinding wheel]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Proceedings of the Volgograd State Technical University. Ser. Advanced technologies in engineering]. 2013, vol. 10, no. 20(123), pp. 49–52.

[12] Riabtev S.A. *Izgotovlenie vysokostrukturnogo abrazivnogo instrumenta* [Manufacturing high structural abrasive tools]. *Vestnik MGTU Stankin* [Herald MSTU Stankin]. 2008, no. 2, pp. 24–31.

[13] Pereladov A.B., Kamkin I.P. Modelirovanie protsessa shlifovaniia s ispol'zovaniem programmnoho kompleksa T-Flex. [Grinding process modeling using software package T-Flex]. *Zaural'skii nauchnyi vestnik* [Zauralskiy Scientific Bulletin]. 2013, no. 1(3), pp. 30–33.

Статья поступила в редакцию 29.11.2013

## Информация об авторах

**ПЕРЕЛАДОВ Александр Борисович** (Курган) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», директор Технопарка Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, Гоголя ул., д. 25, e-mail: [tr@kgsu.ru](mailto:tr@kgsu.ru)).

**КАМКИН Иван Павлович** (Курган) — аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», инженер Технопарка Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, Гоголя ул., д. 25, e-mail: [ipkamkin@gmail.com](mailto:ipkamkin@gmail.com)).

**АНОХИН Андрей Викторович** (Курган) — аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, Гоголя ул., д. 25, e-mail: [sokolnichiy@mail.ru](mailto:sokolnichiy@mail.ru)).

## Information about the authors

**PERELADOV Aleksandr Borisovich** (Kurgan) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Automation of Production Processes» Department, Director of Technopark. Kurgan State University (KSU, Gogol str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: [tr@kgsu.ru](mailto:tr@kgsu.ru)).

**KAMKIN Ivan Pavlovich** (Kurgan) — Post-Graduate of «Automation of Production Processes» Department, Engineer of Technopark. Kurgan State University (KSU, Gogol str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: [ipkamkin@gmail.com](mailto:ipkamkin@gmail.com)).

**ANOKHIN Andrey Viktorovich** (Kurgan) — Post-Graduate of «Automation of Production Processes» Department. Kurgan State University (KSU, Gogol str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: [sokolnichiy@mail.ru](mailto:sokolnichiy@mail.ru)).