

В. А. Носенко, М. В. Даниленко, В. В. Васильев

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
КОНТАКТИРУЮЩИХ ВЕРШИН ЗЕРЕН
НА ПОВЕРХНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА
С УЧЕТОМ МНОГОПРОХОДНОСТИ ПРОЦЕССА**

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ
E-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

В статье изложена методика определения характера распределения контактирующих вершин зерен на рабочей поверхности шлифовального круга в зависимости от времени шлифования. Число контактирующих зерен определяется по вероятности контакта. Отличительная особенность заключается в использовании математической модели, учитывающей изменения распределения вершин зерен в результате изнашивания абразивного инструмента за период шлифования. Рассмотрены вероятности трех видов изнашивания: истирания и скалывания вершины зерна, вырывания зерна из связки круга. Изменение положения вершины зерна под действием того или иного вида изнашивания определяется с использованием Марковских случайных процессов. Условия шлифования, учтенные в модели: характеристика абразивного инструмента, режим шлифования, обрабатываемый материал, начальное распределение зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и прочность их удержания. Результаты работы могут быть использованы для решения задач, связанных с определением интенсивности теплообразования в зоне контакта шлифовального круга и заготовки, расчета мощности резания, износа инструмента и других вопросов, связанных с исследованием процесса шлифования.

Ключевые слова: математические модели, шлифование, абразивный инструмент, вероятность контакта, виды изнашивания.

V. A. Nosenko, M. V. Danilenko, V.V. Vasilyev

**DETERMINING THE CHARACTER OF DISTRIBUTION
THE CONTACT-ING VERTICES OF GRAINS AT THE SURFACE
ON THE GRINDING WHEEL, TAKING INTO ACCOUNT
THE MULTI-PASSAGE OF PROCESS**

Volzhsky Polytechnical Institute (Branch)

The article is devoted to the method of determining the nature of distribution the contacting vertices of grains on the working surface of grinding wheel, depending on the grinding time. The number of contacting grains is determined by the probability of contact. A distinctive feature is the use of a mathematical model that takes into account the change in the distribution of grain vertices as a result of wear of the abrasive tool during the grinding period. Considered the probabilities in three types of wear: abrasion and spallation of the grain's vertices, pull-out grain from the bundles of the wheel. Changing the position of the grain's vertices under the action of a particular type of wear is determined using random Markov's processes. The method takes into account the influence of the following factors: characteristics of the abrasive tool, the grinding mode, the material to be processed, the initial distribution of grains on the abrasive tool working surface and the strength of their retention. The results of the study may be used to solve problems related to determining the intensity of heat generation in the contact zone of the grinding wheel and the billet, calculation of cutting power, tool wear and other issues related to the study of the grinding process.

Keywords: mathematical models, grinding, abrasive tool, contact probability, types of wear.

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 о строении рабочей поверхности (РП) шлифовального круга (ШК), используемых в процессе исследований и анализа.

Известные модели РП ШК существенно отличаются друг от друга по ряду параметров [1–3], что можно объяснить различием применяемых подходов и методик исследований. Модель рельефа поверхности шлифовального круга, основанная на усовершенствованном методе Монте-Карло представлена в работе [4]. Функцию плотности распределения вершин абразивных зерен с учетом их разновысотности определяют посредством измерения топографии поверхности круга. Согласно найденному распределению высоты выступа зерна, вершина генерируется случайным образом и размещается на поверхности круга.

Несмотря на случайный характер распределения зерен, в простейших моделях [5, 6] принимают равномерное распределение зерен по поверхности круга, при этом количество активных зерен может быть определено при помощи аналитических зависимостей [7]. Такие модели имеют невысокую точность и недостаточно полно отражают протекающие при шлифовании физические процессы.

В настоящее время отсутствует единое мнение о характере распределения вершин абразивных зерен в объеме рабочего слоя инструмента, осуществляющих срезание припуска с обрабатываемой заготовки.

При моделировании процесса шлифования необходимо знать распределение контактирующих вершин зерен и координаты их расположения на поверхности шлифовального круга. Таким образом, для оценки и сопоставления известных данных, а также получения дополнительной информации было принято решение о проведении исследований показателей распределения вершин зерен по поверхности инструмента с учетом реальных условий формирования рельефа РП ШК.

Зона контакта ШК и заготовки представляет собой область V , ограниченную снизу условной наружной поверхностью шлифовального круга, сверху плоскостью COZ (рис. 1), За условную

наружную поверхность ШК принимаем поверхность цилиндра, проходящую через наиболее выступающую вершину зерна (рис. 1). Ось цилиндра совпадает с осью вращения ШК. Плоскость COZ проведена через максимальный выступ неровности обрабатываемой поверхности заготовки.

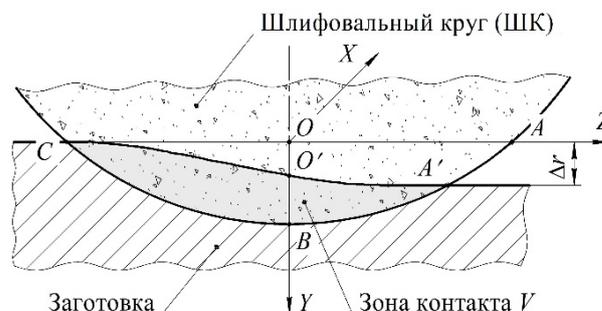


Рис. 1. Зона контакта шлифовального круга и заготовки

Так как процесс микрорезания сопровождается удалением материала в виде стружки, с поверхности заготовки снимается некоторый слой материала, толщиной Δr . В результате контакт вершины наиболее удаленного зерна с обрабатываемым материалом происходит не в точке A , а в точке A' . Согласно данным, представленным в работе [8], закономерность съема припуска определяется линией $CO'A'$, имеющей уровень вероятности контакта $p_k \approx 0,0027$.

Разделим область зоны контакта V горизонтальными и вертикальными плоскостями параллельными координатным осям на n элементарных микрообъемов. Расстояние между плоскостями примем равным радиальному износу круга за один оборот $\Delta R(k)$. Тогда элементарный объем, приведенный к единице высоты ШК:

$$\Delta V = \Delta y \times \Delta z, \text{ где } \Delta y = \Delta z = \Delta R(k). \quad (1)$$

Положение центра каждого микрообъема ΔV_{ij} определяется двумя координатами y_i, z_j [9]. Количество элементарных объемов зависит от размеров зоны контакта, и является величиной переменной в процессе шлифования. Микрообъем ΔV_{ij} можно считать бесконечно малым, поэтому плотность распределения зерен внутри данного объема $\rho_3(y_i, z_j)$ примем постоянной. Тогда, количество вершин в микрообъеме:

$$\Delta n_{ij} = \rho_3(y_i, z_j) \cdot \Delta y \Delta z. \quad (2)$$

Не все вершины абразивных зерен, находящиеся в элементарном микрообъеме проходя через зону контакта взаимодействуют с заго-

товкой. Их количество должно определяться с учетом вероятности контакта. Вероятность контакта вершины зерна с обрабатываемым материалом можно рассчитать по известной теоретико-вероятностной модели Ю. К. Новоселова и А. В. Королева [10].

Количество контактирующих вершин зерен в каждом из микрообъемов определяется по формуле:

$$\Delta n_{зкij} = \rho_з(v_i; z_j) \cdot p_к(v_i; z_j) \cdot \Delta y \Delta z. \quad (3)$$

В процессе шлифования контактирующие с обрабатываемой поверхностью вершины зерен подвергаются различным видам изнашивания, что приводит к изменению плотности их распределения по глубине РП ШК. В свою очередь непостоянство плотности распределения вершин зерен влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности и вероятность неудаления материала. Таким образом, вероятность контакта, также является величиной переменной, изменяющейся в той или иной степени после каждого оборота круга [11].

В качестве примера, рассмотрим реализацию данной методики для случая плоского шлифования периферией круга. Исходные данные для расчета: обрабатываемый материал – Сталь 45 ГОСТ 1050 (*HRC* 42...45); ШК – 1 200×20×76 25А F60 K 6 В 50 м/с 1 кл. ГОСТ Р 52781–2007; $v_k = 37$ м/с; $v_з = 12$ м/мин; $S_t = 0,01$ мм/ход.

На первых оборотах круга уменьшение количества зерен в результате вырывания компенсируется поступлением вершин из более

глубоких слоев в результате их перехода в нижележащий слой на величину износа круга за оборот. К 300-му обороту круга доля вырываемых зерен возрастает, круг переходит в режим самозатачивания и плотность распределения вершин зерен начинает уменьшаться (рис. 2).

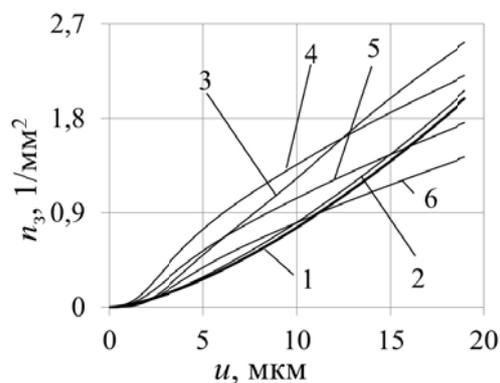


Рис. 2. Плотность распределения вершин зерен $n_з$ по глубине РП ШК в различные периоды шлифования (обороты круга):
1 – начальное распределение; 2 – 30 об.; 3 – 300 об.; 4 – 900 об.; 5 – 1200 об.; 6 – 1500 об.

Среднее количество контактирующих вершин в единицу времени неодинаково и зависит от положения рассматриваемого микрообъема в зоне взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Больше контактирующих вершин зерен находится в середине зоны взаимодействия, вблизи основной плоскости. Меньшее количество вершин соответствует положениям входа и выхода из зоны контакта (рис. 3).

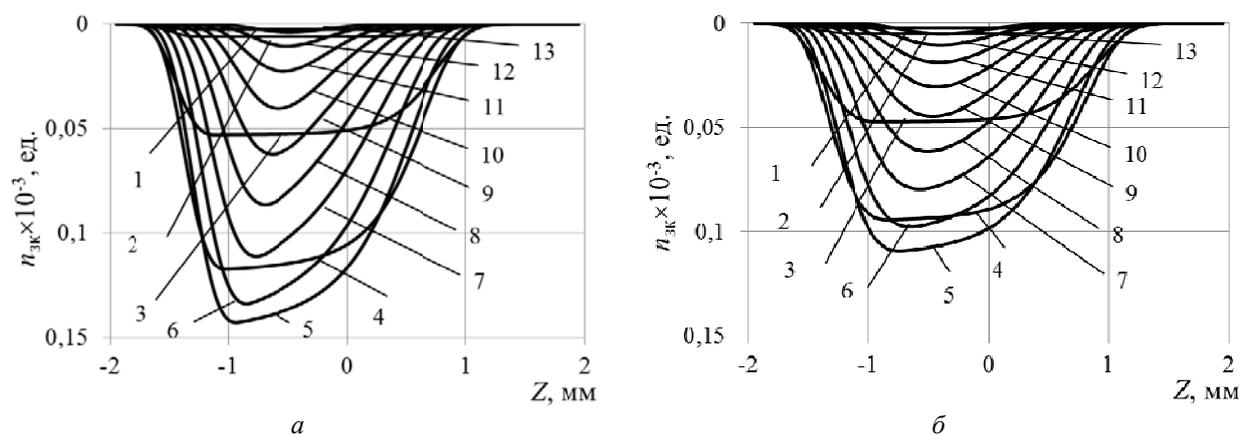


Рис. 3. График изменения количества контактирующих в микрообъеме вершин зерен $n_{зк}$ по длине дуги контакта на 300 (а) и 1500 (б) обороте для различных расстояний u от условной наружной поверхности ШК:
1 – $u=0,5$ мкм; 2 – $u=1,5$ мкм; 3 – $u=2,5$ мкм; 4 – $u=3,5$ мкм; 5 – $u=4,5$ мкм; 6 – $u=5,5$ мкм; 7 – $u=6,5$ мкм; 8 – $u=7,5$ мкм; 9 – $u=8,5$ мкм; 10 – $u=9,5$ мкм; 11 – $u=10,5$ мкм; 12 – $u=11,5$ мкм; 13 – $u=12,5$ мкм

Данные, представленные на рис. 2, 3 позволяют определить суммарное число контакти-

рующих вершин зерен в слое на любом обороте ШК (рис. 4). В период обработки, соответ-

вующий 30 – 900 оборотам круга, происходит увеличение вершин зерен в слоях, расположенных на глубине до 2,5 мкм, и уменьшение числа вершин в слоях на глубине от 2,5 до 15 мкм. Причины такого изменения связаны с изменением плотности распределения вершин зерен в результате изнашивания, объема удаленного металла и вероятности контакта. На последующих оборотах происходит уменьшение количества контактирующих вершин зерен во всех слоях РП ШК.

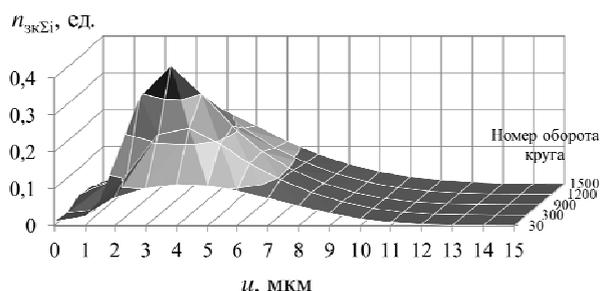


Рис. 4. Диаграмма распределения суммарного числа контактирующих вершин зерен $n_{экΣi}$ в i -м слое по глубине РП ШК в различные периоды шлифования (обороты круга)

Заключение. Проведенные исследования позволят использовать разработанную методику определения распределения контактирующих вершин зерен на РП ШК для моделирования, анализа, прогнозирования показателей процесса шлифования, что является перспективным и актуальным направлением в области абразивной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Werner K., Klocke F., Brinksmeier E. Modelling and simulation of grinding processes // Proc. of the 1st European Conf. on Grinding, Aachen, 6-7 November 2003. P. 8-1–8-27.
2. Переладов, А. Б. Вероятностная компьютерная модель рабочего слоя шлифовального круга / А. Б. Переладов, И. П. Камкин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20(123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 49–52.
3. Detailed modeling of cutting forces in grinding process considering variable stages of grain-workpiece micro interactions / Hao Nan Li, Tian Biao Yu, Zi Xuan Wang, Li Da Zhu, Wan Shan Wang // International Journal of Mechanical Sciences, 2017, vol. 126, pp. 319–339.
4. Influence of surface topography evolution of grinding wheel on the optimal material removal rate in grinding process of cemented carbide / Yuzhou Zhang, Xipeng Xu // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2019, vol. 80, pp. 130–143.
5. Chen X., Rowe W.B. Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1996. Vol. 36, no. 8. P. 871-882.
6. Dynamic grinding force model for carbide insert peripheral grinding based on grain element method / Sijie Cai a, Bin Yao, Qing Zheng, Zhiqin Cai, Wei Feng, Binqiang Chen, Ze He // Journal of Manufacturing Processes, 2020, vol. 58, pp. 1200-1210. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.029>
7. Li K., Liao W. Modelling of ceramic grinding processes Part I. Number of cutting points and grinding forces per grit // Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 65, no. 1. P. 1-10.
8. Новоселов, Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке : монография / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
9. Носенко, В. А. Динамическая теоретико-вероятностная модель силы резания при шлифовании / В. А. Носенко, М. В. Даниленко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (207) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 31–33.
10. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и инструмента и заготовки при абразивной обработке / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратовского университета, 1989. – 160 с.
11. Носенко, В. А. Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием Марковских случайных процессов / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 2-1 (33). – С. 101–106.