

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ЗА ПЕРИОД ЕГО СТОЙКОСТИ

В.Б. Богуцкий, Л.Б. Шрон

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

На основе всестороннего анализа шлифовальных операций выявлено, что наиболее нестабильным элементом системы является шлифовальный круг. В процессе шлифования поверхности резания, образующиеся при движении режущих кромок абразивных зерен в пространстве заготовки, отображаются на ее поверхности в виде микрорельефа. Показано, что основным параметром процесса шлифования, оказывающим наиболее существенное влияние на качество обработки, является форма режущих кромок. Форма единичных рисок на поверхности зависит от особенностей контакта шлифовального круга с материалом заготовки, а также формой абразивных зерен на его рабочей поверхности. Изменение состояния рабочей поверхности шлифовального круга определяется числом режущих кромок, их формой, распределением режущих кромок на рабочей поверхности. Разработана методика и проведены исследования для определения эмпирических коэффициентов, описывающие влияние времени работы шлифовального круга после его правки на параметры состояния рабочей поверхности. Предложены аналитические зависимости для расчета ожидаемой шероховатости поверхности, силы резания и др. Установлено, что с увеличением времени работы инструмента наблюдается увеличение ширины режущей кромки и радиуса закругления при вершине инструмента и при работе в режиме затупления появляются почти плоские вершины. Выполненные экспериментальные исследования подтверждают вывод, что за период стойкости инструмента при работе в режиме затупления наиболее значительно изменяется форма режущих кромок. Проведенные исследования по износу единичных абразивных зерен круга подтверждают качественную картину износа. Сопоставление расчетных значений радиуса закругления с экспериментальными указывает на их достаточно хорошее совпадение.

Ключевые слова: шлифовальный круг, профиль поверхности круга, абразивное зерно, ширина зерна, форма режущих кромок, шероховатость поверхности.

Введение. Процесс шлифования имеет вероятностный характер, что вызывает разброс характеристик качества обрабатываемых деталей [1–6]. В процессе шлифования поверхности резания образующиеся при движении режущих кромок абразивных зерен в пространстве заготовки отображаются на ее поверхности в виде микрорельефа и, следовательно, форма единичных рисок на поверхности зависит от особенностей контакта с материалом поверхности и формой абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга.

Для шлифовальных операций наиболее нестабильным элементом системы является шлифовальный круг. Следует отметить, что в 65...75 % случаев используются шлифовальные круги на керамической связке, работающие в режиме затупления [7–11], свойства которых в результате износа абразивных зерен меняются в процессе эксплуатации. Как следствие, меняются сила резания, температура в зоне обработки, шероховатость обрабатываемой поверхности и производительность обработки.

Изменение состояния рабочей поверхности шлифовального круга определяется числом режущих кромок, их формой, распределением режущих кромок на рабочей поверхности, засаливанием и т. д. По данным [3, 12–15], основным параметром процесса шлифования, оказывающим наиболее существенное влияние, является форма режущих кромок. Исследования авторов [1, 3, 8, 13–15] показали, что наиболее адекватной моделью вершины зерна является модель в виде параболоида вращения (рис. 1).

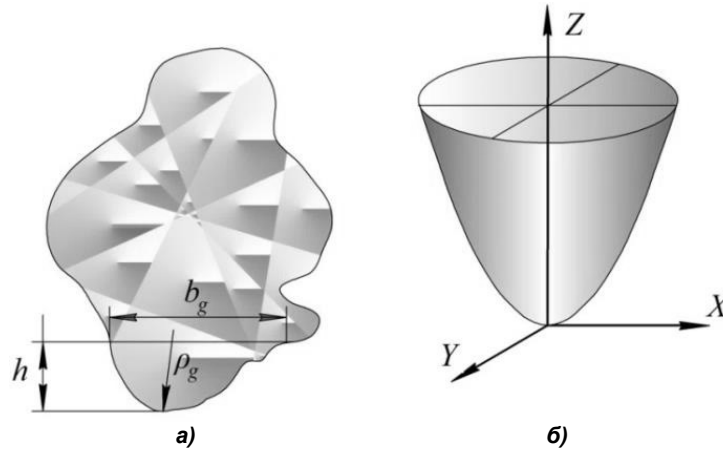


Рис. 1. Модели абразивного зерна: а – контур зерна; б – параболоид вращения

Согласно [3, 4, 15–19] расчет характеристик шероховатости поверхности, съема материала заготовки, силы резания, температуры в зоне контакта абразивного зерна с материалом заготовки можно выполнить, основываясь на ширине абразивного зерна b_g и радиусе закругления его вершины ρ_g .

В работах [3, 8, 14, 16, 18] показано, что ширину абразивного зерна b_g на расстоянии h от его вершины можно определять по зависимости

$$b_g = 2\sqrt{2\rho_g h}, \tag{1}$$

где ρ_g – радиус округления при вершине зерна.

Для всех разновидностей форм абразивных зерен уравнение, описывающее ширину абразивного зерна b_g , имеет вид (см. уравнение (2)), в котором коэффициент C_b и показатель степени m необходимо определять экспериментально [3, 18–20]:

$$b_g = C_b h^m. \tag{2}$$

Согласно [3, 14, 16–19] текущее значение коэффициента $C_{b\tau}$ может быть вычислено по зависимости (3), $b_{g\tau}$ из зависимости (4), а после правки поверхности шлифовального круга плотность распределения абразивных зерен можно моделировать зависимостью

$$C_{b\tau} = C_b \left(\frac{t_f - u}{t_f - u - h_g} \right)^m, \tag{3}$$

$$b_{g\tau} = C_b \left(\frac{t_f - u}{t_f - u - h_g} \right)^m \cdot h_\tau^m, \tag{4}$$

$$f_\xi(u) = C_f u^{\chi-1}, \tag{5}$$

где t_f – фактическая глубина резания; u – расстояние от условной наружной поверхности шлифовального круга до вершины зерна; h_τ – расстояние до рассматриваемого уровня от вершины изношенного зерна; C_f и χ – коэффициент и показатель степени.

Целью статьи является изучение влияния времени работы шлифовального круга после правки на параметры состояния его рабочей поверхности и получение отдельных эмпирических коэффициентов, необходимых для численных расчетов ожидаемой шероховатости поверхности, силы резания и др.

Для экспериментальных исследований параметров рабочей поверхности инструмента применяют такие методы получения первичной информации, как царапание полированного образца, непосредственное наблюдение за режущими кромками с помощью профилографирования, оптического или электронного микроскопа. Их подробный анализ выполнен в работах [15, 18–23].

Материал и методы. В проводимых исследованиях для анализа изменения числа и распределения режущих кромок применили метод профилографирования поверхности круга, а для исследования изменения геометрии режущих кромок – метод царапания полированного образца.

Профилограммы круга снимали в направлении, перпендикулярном вектору скорости резания непосредственно на круглошлифовальном станке BUA16 (рис. 2, а), оборудованном тензометрическими центрами (рис. 2, б) и вибродатчиком (рис. 2, в). Параметры ошупывающих игл соответственно равны: угол при вершине профиля – 90° и 110° , радиус округления – 2 и 3 мкм; длина вершины клина иглы – 0,43 и 0,25 мм. Скорость перемещения иглы относительно рабочей поверхности инструмента составляла 1,0 и 0,4 мм/с.

Для измерения разновысотности зерен записывали по пять участков рельефа круга длиной 15 мм каждый. На профилограмме выбирали 2...3 наиболее выступающие вершины, проводили по ним линию нулевого уровня и измеряли расстояния до других вершин зерен. Весь диапазон высоты профиля разбили на интервалы, по результатам замеров строили кривые изменения частоты режущих кромок по глубине инструмента. Для аналитического описания закона распределения режущих кромок по глубине инструмента применяли бета-распределение [1–3]. Результаты статистической проверки гипотезы о законе распределения режущих кромок кругов 24AF60L6V после 10 мин шлифования приведены в табл. 1.

При оценке изменения профиля вершины абразивных зерен шлифовальный круг прижимали к полированному образцу и проворачивали на 2...3 мм. Для снижения искажения профиля вследствие пластических деформаций образец изготовили из закаленной стали ШХ15, HRC 55...60.

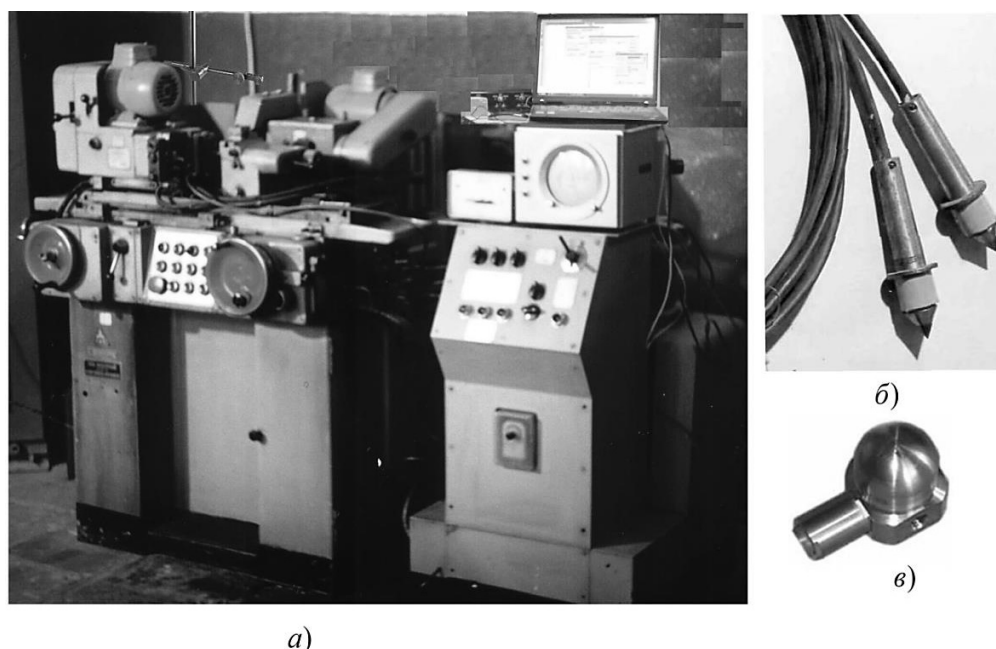


Рис. 2. Общий вид установки для исследования процесса шлифования:
а – станок BUA16, б – тензометрические центры, в – вибродатчик

Исследование изменения состояния рабочей поверхности шлифовального круга проводилось при шлифовании стальных образцов (сталь 40X, HRC размеры $d \times l = 35 \times 60$ мм) кругом 1 250×32×76, марки 24AF60L6V на режимах $V_k = 31,7$ м/с, $V_d = 27$ м/мин, $S_{пр} = 1,3$ м/мин, $S_{поп} = 0,01$ мм/дв.ход. Характеристики рабочей поверхности шлифовального круга контролировались сразу после правки и спустя 10, 20 и 30 мин работы.

Повторяемость опытов была принята равной пяти. Радиусы закругления вершин зерен в плоскости, перпендикулярной вектору скорости резания, измеряли шаблонами по профилограммам, снятым с царапин при одинаковом горизонтальном и вертикальном увеличении. При уровне значимости 0,95 табличное значение χ^2 равно 26,3. Расчетные радиусы вершины абразивных зерен рассчитывались по зависимости (1).

Величина относительного износа $h_0 = 2,8 \times 10^{-7}$ мм определялась по величине размерного износа $\Delta R = 14,5$ мкм и пути резания единичным зерном за 30 мин работы инструмента.

Для описания текущего профиля измерялась ширина царапин на различных уровнях от впадин. Результаты измерений аппроксимировали уравнениями вида $b_g = C_b \times h^m$.

Таблица 1

Статистическая проверка гипотезы о законе распределения вершин зерен по глубине инструмента 1 250×32×76 марки 24AF60L6V

№ интервала i	Интервал, мкм	Частота вершин зерен m_i	Расчетная вероятность попадания в интервал P_i	№ интервала i	Интервал, мкм	Частота вершин зерен m_i	Расчетная вероятность попадания в интервал P_i
1	0–2,1	9	0,0888	11	21,0–23,1	4	0,0528
2	2,1–4,2	16	0,0972	12	23,1–25,2	8	0,0456
3	4,2–6,3	18	0,0962	13	25,2–27,3	5	0,0405
4	6,3–8,4	27	0,0923	14	27,3–29,4	4	0,0345
5	8,4–10,5	22	0,0883	15	29,4–31,5	4	0,0286
6	10,5–12,6	17	0,0830	16	31,5–33,6	3	0,0230
7	12,6–14,7	11	0,0774	17	33,6–35,7	3	0,0177
8	14,7–16,8	13	0,0714	18	35,7–37,8	2	0,0126
9	16,8–18,9	6	0,0653	19	37,8–39,9	2	0,0088
10	18,9–21,0	9	0,0591				

При исследовании законов распределения режущих кромок по глубине инструмента шлифовали образцы из закаленной стали ШХ15 (HRC 55...60) на станке BUA16 кругами 1 250×32×76 марок 24AF60L6V и 24AF60N7V ($V_k = 31,7$ м/с, $V_d = 39$ м/мин, $S_{пр} = 0,9$ м/мин, $S_{поп} = 0,01$ мм/дв.ход). Результаты экспериментов обрабатывались в программе Stata 8.0.

В табл. 2. приведены данные по коэффициенту корреляции между шириной режущей кромки и расстоянием до уровня от вершины зерна, расчетными и табличными значениями критерия для оценки коэффициента корреляции, коэффициенту пропорциональности и показателю степени уравнения регрессии, радиусу закругления при вершине зерна.

Таблица 2

Геометрия режущих кромок абразивных зерен круга 1 250×32×76 марки 24AF40K7V

Время работы инструмента, τ , мин	Коэффициент корреляции, r_{bi}	Расчетные значения		Радиус закругления при вершине зерна ρ_g , мкм	
		C_b	m	расчетный	эксперимент
0	0,78	1,13	0,65	26	26
15	0,78	1,36	0,94	78	66
30	0,73	1,48	0,64	–	–

Результаты и обсуждение. Для всех τ коэффициент корреляции значим и равен 0,7...0,8, что свидетельствует о достаточно тесной связи между b_g и h_g . С увеличением времени работы инструмента наблюдается закономерное увеличение ширины режущей кромки и радиуса закругления при вершине инструмента, а при работе в режиме затупления появляются почти плоские вершины. Сопоставление расчетных значений радиуса закругления с экспериментальными показывают на их достаточно хорошее соответствие.

Таким образом, проведенные исследования по износу единичных абразивных зерен круга подтверждают качественную картину износа, полученную в работах [3, 8, 15–19], и позволяют сделать заключение об адекватности зависимостей (2) и (4) реальному процессу. Результаты экспериментов по исследованию законов распределения режущих кромок абразивных зерен по глубине шлифовального круга приведены в табл. 3, 4 и на рис. 3.

Отмечается заметное изменение закона распределения режущих кромок по глубине шлифовального круга. Максимум кривых смещается по глубине шлифовального круга, частота снижается с увеличением времени его работы. Для испытанных марок кругов наибольшие изменения закона распределения наблюдаются в первые минуты работы инструмента, когда из связки вырываются и разрушаются абразивные зерна, поврежденные правкой круга. При дальнейшей работе шлифовального круга изменения в законе распределения снижаются. Об этом же свидетельствует анализ параметров распределения при моделировании участков кривых распределения, лежащих в пределах глубины резания, зависимостью [3, 12–14, 24]:

$$f_{\xi}(u) = \frac{\chi u^{\chi-1}}{H_u^{\chi}}, \quad (6)$$

где H_u – слой круга, в котором распределены режущие кромки (принимается равным фактической глубине резания t_f).

Таблица 3
Параметры гистограмм и распределений режущих кромок абразивных зерен по глубине шлифовального круга

Марка круга	Время работы инструмента τ , мин	Параметры гистограмм		Параметры бета-распределения		Показатели для проверки закона распределения	
		\bar{X}	S^2	η	γ	β_1	β_2
24AF60K7V	0	0,24	0,029	2,1	1,3	0,67	3,5
	4	0,28	0,040	2,3	1,2	0,51	2,7
	8	0,32	0,048	2,3	1,2	0,33	2,2
	10	0,33	0,049	2,4	1,2	0,33	2,2
24AF60N7V	0	0,37	0,62	1,7	1,0	0,19	2,2
	4	0,35	0,55	2,0	1,1	0,28	1,6
	8	0,37	0,053	2,1	1,3	0,17	2,0
	12	0,36	0,054	2,1	1,2	0,18	2,0

Таблица 4
Значение коэффициентов χ и H_u в уравнении (6)

Время работы инструмента τ , с	Значение коэффициентов		Время работы инструмента τ , с	Значение коэффициентов	
	χ	H_u		χ	H_u
0	1,49	0,012	8	1,79	0,016
1	1,79	0,016	10	1,71	0,020
4	1,7	0,016			

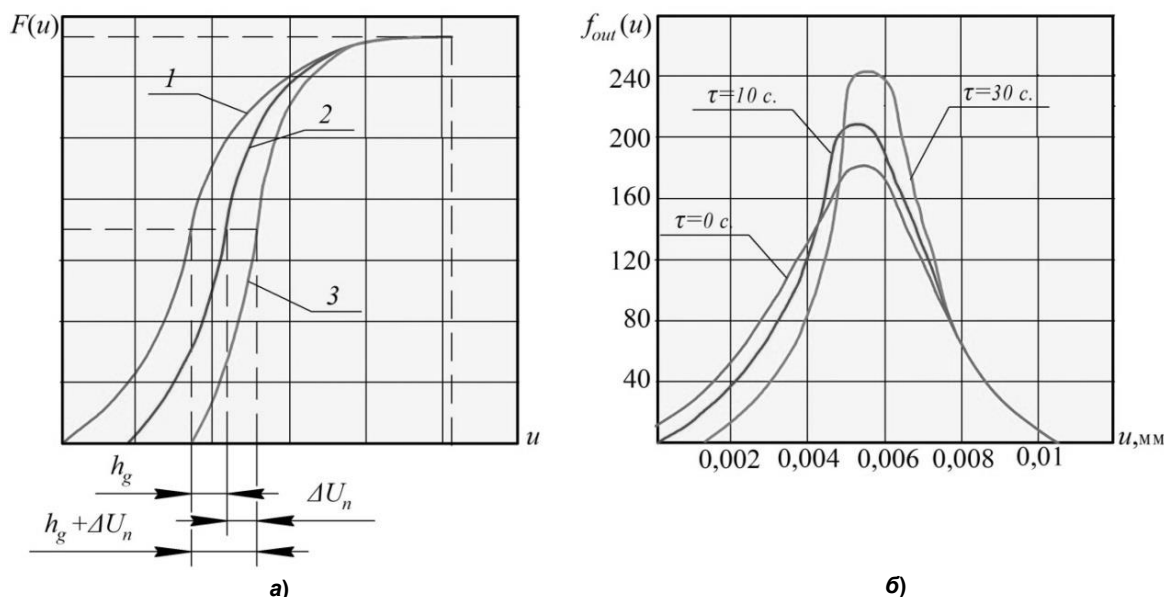


Рис. 3. Распределение режущих кромок абразивных зерен шлифовального круга:
 а – распределение по глубине; б – плотность распределения по глубине

За первую минуту работы инструмента показатель χ изменяется в 1,3 раза, за последующий период он колеблется в пределах погрешности экспериментальных данных.

Заключение. Выполненные экспериментальные исследования подтверждают вывод, что за период стойкости инструмента при работе в режиме затупления наиболее значительно изменяется форма режущих кромок. Подтверждено, что полученные различными авторами зависимости

обеспечивают достаточно полное описание рабочей поверхности инструмента, соответствуют реальному процессу и могут использоваться для прогнозирования показателей процесса шлифования и разработке оптимизационных моделей. Для кругов марок 24AF60L6V и 24AF60N7V получены эмпирические коэффициенты, необходимые для выполнения численных расчетов ширины и радиуса округления абразивного зерна.

Литература

1. Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes / T.J. Choi, N. Subrahmanya, H. Li, Y.C. Shin // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2008. – Vol. 48. – Iss. 1. – P. 61–72.
2. Stępień, P. A probabilistic model of the grinding process / P. Stępień // *Applied Mathematical Modelling*. – 2009. – Vol. 33. – Iss. 10. – P. 3863–3884.
3. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
4. Modeling of the micro-grinding process considering the grinding tool topography / M. Kadivar, A. Zahedi, B. Azarhoushang, P. Krajnik // *International Journal of Abrasive Technology*. – 2017. – Vol. 8. – Iss. 2. – P. 157–170. DOI: 10.1504/IJAT.2017.089292
5. Saxena, K.K. Surface roughness prediction in grinding: a probabilistic approach / K.K. Saxena, S. Agarwal, R. Das // *2016 International Conference on Design, Mechanical and Material Engineering (D2ME 2016), MATEC Web of Conferences*. – 2016. – Vol. 82. DOI: 10.1051/mateconf/20168201019
6. Белкин, Е.А. Стохастическая модель процесса абразивной обработки / Е.А. Белкин // *Справочник. Инженерный журнал*. – 2004. – No. 3. – С. 20–25.
7. Conditioning and monitoring of grinding wheels / K. Wegener, H.-W. Hoffmeister, B. Karpuschewski et al. // *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 60. – P. 757–777.
8. Королев, А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 192 с
9. Marinescu, I.D. Handbook of Machining with Grinding Wheels, Second Edition / I.D. Marinescu, M.P. Hitchiner. – CRC Press, 2016. – 750 p.
10. Industrial challenges in grinding / J.F.G. Oliveira, E.J. Silva, C. Guo, F. Hashimoto // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 58. – Iss. 2. – P. 663–680.
11. Klocke, F. Manufacturing Processes 2. Grinding, Honing, Lapping / F. Klocke. – Springer-Verlag, Berlin, 2009. – 451 p.
12. Kryukov, S.A. Determining the parameters of grinding wheels working surface profile / S.A. Kryukov, A.S. Kryukova // *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 204–209. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.461
13. Ichida, Y. Formation mechanism of grain cutting edges in micro dressing of polycrystalline CBN grinding wheels / Y. Ichida // *Key Engineering Materials*. – 2012. – Vol. 523–524. – P. 137–142.
14. Cutting geometry of abrasive grains / A.V. Korolev, A.N. Vasin, V.A. Nazar'eva, O.P. Reshetnikova // *Russian Engineering Research*. – 2014. – Vol. 34, no. 10. – P. 655–659.
15. Malkin, S. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, C. Guo. – New York: Industrial press, 2008. – 372 p.
16. Novoselov, Yu. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear / Yu. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 809–814.
17. Generalized mathematical model predicting the mechanical processing topography / S.L. Leonov, A.M. Markov, A.B. Belov, N. Sczygol // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 7. "VII International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering, ISPCIME 2015"*, 2016. DOI: 10.1088/1757-899X/126/1/012009
18. Marinescu, I.D. Tribology of abrasive machining processes / I.D. Marinescu, W.B. Rowe, B. Dimitrov, I. Inasaki. – Publ. by Brent Beckley, Inc., Cover Art, 2004. – 764 p.
19. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
20. An Investigation into the Influences of Grain Size and Grinding Parameters on Surface Roughness and Grinding Forces when Grinding / H. Demir, A. Gullu, I. Ciftci, U. Seker // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. – 2010. – Vol. 56. – Iss. 7/8. – P. 447–454.

21. Nguyen, A.T. *Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterization* / A.T. Nguyen, D.L. Butler // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 208, iss. 1–3. – P. 14–23.

22. Narayanaperumal, A. *Evaluation of the working surface of the grinding wheel using speckle image analysis* / A. Narayanaperumal, V. Lakshmanan // *Proceedings of the ASME 2015 International Conference on Manufacturing Science and Engineering (MSEC2015)*. – 2015. – Vol. 1. – Paper № MSEC2015-9416. DOI: 10.1115/MSEC2015-9416

23. Шейко, М.Н. *Теоретико-вероятностная интерпретация погрешности метода профилографирования при исследовании рельефа абразивно-алмазного инструмента* / М.Н. Шейко // *Сверхтвердые материалы*. – 1998. – № 5. – С. 46–50.

24. Novoselov, Yu. *Patterns of removing material in workpiece – grinding wheel contact* / Y. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // *4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017)*. – *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 991–996.

Богущий Владимир Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, bogutskivb@yandex.ru.

Шрон Леонид Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, shronlb@mail.ru.

Поступила в редакцию 15 марта 2019 г.

DOI: 10.14529/engin190206

CHANGE IN THE CHARACTERISTICS OF THE GRINDING WHEEL FACE DURING ITS REDRESS LIFE

V.B. Bogutsky, bogutskivb@yandex.ru,

L.B. Shron, shronlb@mail.ru

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Based on a comprehensive analysis of grinding operations, it was found that grinding wheels are the most unstable elements of the system. During grinding, the cutting surfaces are formed by the movement of the cutting edges of abrasive grains in the workpiece space. They form a micro-relief on the workpiece surface. It was shown that the main parameter of the grinding process that has the most significant impact on the quality of cutting is the shape of the cutting edges. The shape of single surface scratches depends on the characteristics of the contact between the grinding wheel and the workpiece material, as well as the shape of abrasive grains on the grinding wheel face. Change of state of the grinding wheel face is determined by the number of cutting edges, their shape, and the distribution of cutting edges on the wheel face. We developed a methodology and conducted research to determine the empirical coefficients that define the influence of the working time of a dressed grinding wheel on the state variables of the working surface. We proposed analytical expressions for calculating the expected surface roughness, cutting force, etc. It was found that an increase in tool operation time leads to an increase in the width of the cutting edge and the radius of curvature at the top of the tool; and when it operates in the blunt mode, there are near-planar vertices. The experimental studies confirm the conclusion that the shape of the cutting edges changes most significantly when the tool operates in the blunt mode during its tool life. The research on the wear of single abrasive grains of the circle confirms the qualitative characteristics of wear. The calculated values of the curvature radius when compared to the experimental ones show quite a good coincidence.

Keywords: grinding wheels, wheel surface profiles, abrasive grain, grain width, shape of cutting edges, surface roughness.

References

1. Choi T.J., Subrahmanya N., Li H., Shin Y.C. Generalized Practical Models of Cylindrical Plunge Grinding Processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, no. 1, pp. 61–72.
2. Stępień P. A Probabilistic Model of the Grinding Process. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, vol. 33, no. 10, pp. 3863–3884.
3. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke* [Dynamics of Forming Surfaces During Abrasive Machining]. Sevastopol, SevNTU Publ., 2012. 304 p.
4. Kadivar M., Zahedi A., Azarhoushang B., Krajnik P. Modeling of the Micro-Grinding Process Considering the Grinding Tool Topography. *International Journal of Abrasive Technology*, 2017. vol. 8, no. 2, pp. 157–170. DOI: 10.1504/IJAT.2017.089292
5. Saxena K.K., Agarwal S., Das R. Surface Roughness Prediction in Grinding: a Probabilistic Approach. 2016 International Conference on Design. *Mechanical and Material Engineering (D2ME 2016), MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 82. DOI: 10.1051/mateconf/20168201019
6. Belkin E.A. [Stochastic Model of the Abrasive Machining]. *HANDBOOK. An Engineering journal*, 2004, no. 3, pp. 20–25. (in Russ.)
7. Wegener K., Hoffmeister H.-W., Karpuschewski B. et al. Conditioning and Monitoring of Grinding Wheels. *CIRP Annals. Manufacturing Technology*, 2011, vol. 60, pp. 757–777.
8. Korolev A.V. *Issledovanie processov obrazovaniya poverhnostej instrumenta i detali pri abrazivnoj obrabotke* [Research of Processes of Formation of Surfaces of the Tool and the Workpiece During Abrasive Machining]. Saratov: Saratovsk. univ. Publ., 1975. 192 p.
9. Marinescu I.D., Hitchiner M.P. Handbook of Machining with Grinding Wheels, Second Edition. *CRC Press Publ.*, 2016. 750 p.
10. Oliveira J.F.G., Silva E.J., Guo C., Hashimoto F. Industrial Challenges in Grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, no. 2, pp. 663–680.
11. Klocke F. *Manufacturing Processes 2. Grinding, Honing, Lapping*. Springer-Verlag Publ., 2009. 451 p.
12. Kryukov S.A., Kryukova S.A. Determining the Parameters of Grinding Wheels Working Surface Profile. *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 204–209. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.461
13. Ichida Y. Formation Mechanism of Grain Cutting Edges in Micro Dressing of Polycrystalline CBN Grinding Wheels. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 523–524, pp. 137–142.
14. Korolev A.V., Vasin A.N., Nazar'eva V.A., Reshetnikova O.P. Cutting Geometry of Abrasive Grains. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 10, pp. 655–659.
15. Malkin S., Guo C. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. *Industrial press Publ.*, 2008. 372 p.
16. Novoselov Yu., Bratan S., Bogutsky V. Analysis of Relation Between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear. *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 809–814.
17. Leonov S.L., Markov A.M., Belov A.B., Sczygol N. Generalized Mathematical Model Predicting the Mechanical Processing Topography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 7. VII International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering, (ISPCIME 2015)*, 2016. DOI: 10.1088/1757-899X/126/1/012009
18. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. *Tribology of abrasive machining processes*. Brent Beckley Inc. Publ., Cover Art, 2004. 764 p.
19. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' processa shlifovaniya stal'nyh detalej* [The Productivity of the Grinding Process of Steel Details]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 280 p.
20. Demir H., Gullu A., Ciftci I., Seker U. An Investigation into the Influences of Grain Size and Grinding Parameters on Surface Roughness and Grinding Forces when Grinding. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 2010, vol. 56, no. 7–8, pp. 447–454.
21. Nguyen A.T., Butler D.L. Correlation of Grinding Wheel Topography and Grinding Performance: a Study from a Viewpoint of Three-Dimensional Surface Characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 208, no. 1–3, pp. 14–23.

22. Narayanaperumal A., Lakshmanan V. Evaluation of the Working Surface of the Grinding Wheel Using Speckle Image Analysis. *Proceedings of the ASME 2015 International Conference on Manufacturing Science and Engineering (MSEC2015)*, 2015, vol. 1, paper № MSEC2015-9416. DOI: 10.1115/MSEC2015-9416

23. Shejko M.N. [Theoretical-Probabilistic Interpretation of the Error of the Method of Profilography in the Study of the Relief of Abrasive-Diamond Tools]. *Journal of Superhard Materials*, 1998, no. 5, pp. 46–50. (in Russ.)

24. Novoselov Yu., Bogutsky V., Shron L. Patterns of Removing Material in Workpiece – Grinding Wheel Contact. *4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017). Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 991–996.

Received 15 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Богущий, В.Б. Изменение характеристик рабочей поверхности шлифовального круга за период его стойкости / В.Б. Богущий, Л.Б. Шрон // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 66–74. DOI: 10.14529/engin190206

FOR CITATION

Bogutsky V.B., Shron L.B. Change in the Characteristics of the Grinding Wheel Face During Its Redress Life. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 66–74. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin190206