



**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)

## Экспериментальное изучение износа рабочей поверхности шлифовального круга

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

*Повышение производительности и качества шлифования в значительной мере сдерживается отсутствием универсальных методик численного расчета оптимальных режимов обработки и статических характеристик инструмента. Это обусловлено, в том числе, нестационарностью показателей процесса шлифования, которые значительно меняются в течение периода стойкости шлифовального круга (ШК). Одним из важных, но малоизученным фактором является форма рабочей поверхности ШК. В процессе экспериментального исследования по методике 3-мерного моделирования впервые были получены модели, описывающие форму износа рабочей поверхности ШК, и зависимость площади контакта ШК с заготовкой от износа ШК. Использование результатов исследования позволит получить более точные данные о силах резания, скорости изнашивания инструмента, а также о других показателях процесса шлифования, оценить динамику их изменения в течение периода стойкости ШК. Результаты исследования могут найти применение в машиностроении и других областях, где используются операции шлифования металлов.*

**Ключевые слова:** шлифовальный круг, форма рабочей поверхности, износ круга, заготовка, площадь контакта.

## Experimental study of wear of the working surface of a grinding wheel

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

*An increase in productivity and quality of grinding is largely restrained by the lack of universal numerical methods of calculation of optimal process conditions and static characteristics of the cutting tool. This is due to the fact that grinding process parameters vary significantly over the lifespan of a grinding wheel (GW). One of the important but poorly known factors is the shape of the GW working surface. The 3D experimental modeling made it possible to develop a model describing the wear shape of the GW working surface and the dependence of the GW-workpiece contact area on the GW wear. The results of the study will enable more accurate data about cutting forces, tool wear rates, and other parameters of the grinding process. They will also make it possible to assess the dynamics of the parameters over the GW lifespan. The results can be used in engineering and other industries applying grinding of metals.*

**Keywords:** grinding wheel, working surface, form, wear, workpiece, contact area.

Известно, что многие показатели и результаты процесса шлифования подвержены значительному изменению в течение периода стойкости шлифовального круга (ШК). Например, силы шлифования, скорость изнашивания инструмента и показатели качества обработки могут в несколько раз менять свои первоначальные значения [1]. Анализ работ по данной теме показал, что одной из главных причин нестационарности процесса абразивной обработки, наряду с затуплением вершин активных абразивных зерен и засаливанием рабочей поверхности (РП) инструмента, является изменение ее первоначальной формы, сформированной при правке правящим инструментом [2]. Очевидно, что изменение первоначальной формы РП ШК, связанное с ее износом, приводит к значительному изменению макро- и микропоказателей взаимодействия ШК с поверхностью шлифуемой заготовки и, как следствие, снижению эффективности процесса шлифования в целом [3, 4].

В настоящее время закономерности износа РП ШК в достаточной мере не изучены и, как правило, не учитываются при проектировании шлифовальных операций в отличие от известных расчетных методик, созданных, например, для расчета операций лезвийной обработки, в которых геометрические параметры режущей части инструмента и степень ее затупления являются наиболее значимыми факторами. Получение математических моделей, учитывающих влияние геометрии РП на процесс шлифования, способствовало бы созданию методики численного расчета, позволяющей с большей степенью достоверности прогнозировать требуемые показатели и результаты обработки.

Обзор научно-технической литературы по данному вопросу привел к выводу о необходимости проведения дополнительных исследований. Практически во всех изученных работах [5–10] модели ШК имели форму РП, сформированную при ее правке, что не соответствовало, в большинстве случаев, имеющимся условиям процесса обработки [1–3].

Изменение формы РП в процессе работы ШК изучалось в ходе проведения лабораторного физического эксперимента, путем осуществ-

ления испытаний инструмента, в соответствии с разработанной методикой. Эксперимент проводился на станке мод. 3Е711ВФ3 по схеме плоского многоходового шлифования периферией круга с поперечной подачей. Характеристики ШК: 1 250×20×76 25А F60 К 8 V. Шлифуемый образец — сталь ХВГ (размеры обрабатываемой поверхности 99×42 мм, твердость HRC 62). Режимы шлифования: скорость круга  $V_{кр} = 36,6$  м/с, продольная подача  $S_{прод} = 0,15$  м/с, поперечная подача  $S_{поп} = 2$  мм/ход, глубина шлифования  $t = 0,04$  мм.

Эксперимент выполнялся следующим образом. На шпиндель плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ3 устанавливался ШК, РП которого правилась алмазным карандашом. Шлифуемый образец закреплялся в динамометре мод. УДМ-100, установленном на рабочем столе станка, и подвергался обработке в указанных выше режимах. Профиль РП ШК фиксировался на специально подготовленном образце из закаленной стали с зачерненной поверхностью, первоначально, сразу после правки и, затем, периодически после определенного числа поперечных ходов рабочего стола станка в каждом направлении. Фиксация формы профиля осуществлялась врезанием круга в поверхность образца на всю его высоту с глубиной 0,05...0,06 мм, несколько превышающей глубину шлифования, посредством продольной подачи ( $S_{прод} = 0,017$  м/с). После очередной фиксации профиля РП шлифование возобновлялось без правки инструмента. Фотографирование образцов осуществлялось цифровым аппаратом с разрешением матрицы 16 Мпикселей с 4-кратным оптическим увеличением. Примеры полученных изображений следов профилей РП ШК с различной степенью износа приведены на рис. 1.

Результаты проведенного эксперимента позволили оценить ряд количественных и качественных показателей процесса шлифования, обусловленных изменением формы профиля РП инструмента.

Окончательная стабилизация изменения формы профиля РП наступила после 160 поперечных ходов (рис. 1, е) рабочего стола станка в каждом направлении. Очевидно, что такая

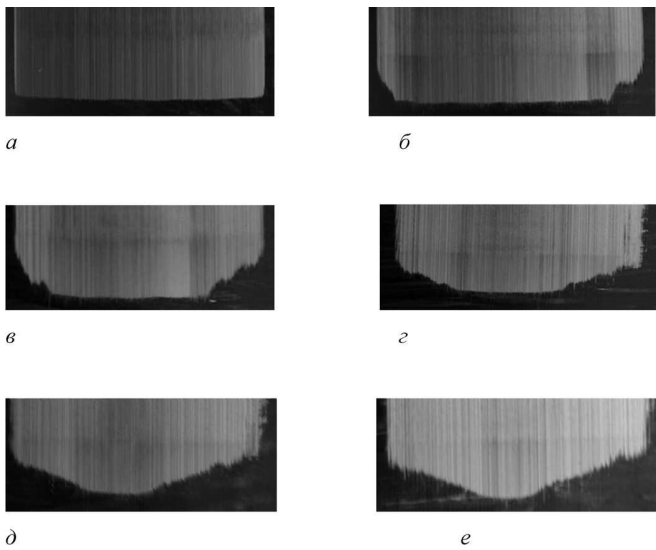


Рис. 1. Зафиксированные изображения следов профиля РП ШК с различной степенью износа:

- a* — после правки; *б* — после двух поперечных ходов; *в* — после 20 поперечных ходов;
- г* — после 80 поперечных ходов;
- д* — после 120 поперечных ходов;
- е* — после 160 поперечных ходов

форма профиля является энергетически оптимальной для данных условий и поддерживается равновесием диссипативной системы ШК — заготовка, рассеивающей энергию процесса, подведенную приводами станка, что согласуется с теорией естественного износа В.В. Шульца [11]. В дальнейшем, РП изнашивались в радиальном направлении ШК эквидистантно достигнутую форму. Результирующая сила шлифования (*P*), которая контролировалась в ходе эксперимента, достигла предельных значений после 80 поперечных ходов, что, как видно на рис. 1, *г*, соответствует наибольшему засаливанию РП инструмента. При этом визуально наблюдалась наибольшая интенсивность прижогов, оставленных кругом на обработанной поверхности заготовки, при шлифовании с поперечной подачей и врезании его в образец. После, примерно, 100 поперечных ходов, произошло заметное снижение прижогов и, в меньшей степени (на 5...7%), сил шлифования, которые увеличились в 2,34 раза по отношению к своим начальным значениям. Значения параметров *R*, *F* и *P* шлифования приведены ниже:

Параметр	Количество поперечных ходов					
	0	2	20	80	120	160
<i>R</i> , % от <i>R</i> <sub>max</sub>	0	19	48	94	—	—
<i>F</i> , мм <sup>2</sup>	6,33	10,17	11,94	13,86	—	—
<i>P</i> , Н	70,7	121,7	144,1	165,4	156,5	154,3

Анализ изображений следов профилей позволил выявить и представить в виде геометрических моделей характерные формы РП, соответствующие определенной степени износа ШК (рис. 2), которые, в первом приближении, описывались отрезками и дугами окружностей, имеющими различные радиусы кривизны:

- отрезки *AB*, *A<sup>1</sup>F* и *BF* при отсутствии «заборного конуса» в начальный период работы инструмента после правки (*R*<sub>min</sub> = 0, рис. 1, *a*);
- дуги *AC*, *EA<sup>1</sup>* и отрезком прямой *CE* (при *R*<sub>min</sub> < *R* < *R*<sub>max</sub>, рис. 1, *б*, *в*), при наличии прямолинейного участка неизношенного профиля;
- дуги *AA<sup>1</sup>* при «заборном конусе», соответствующем половине высоте профиля круга (при *R* = *R*<sub>max</sub>, рис. 1, *г*).

Геометрическая модель для двух последних вариантов износа профилей (рис. 1, *д*, *е*) не разрабатывалась, поскольку ШК в этих случаях имел промежуточные показатели работы по силам и прижогам.

Для расчета реальных координат точек профилей РП использовались масштабные изображения образцов (см. рис. 1). Расчет *R*<sub>max</sub> проводился для дуги, содержащей точки *A*, *D* и *A<sup>1</sup>*, координаты взаимного расположения которых определялись высотой ШК (*T*) и глубиной

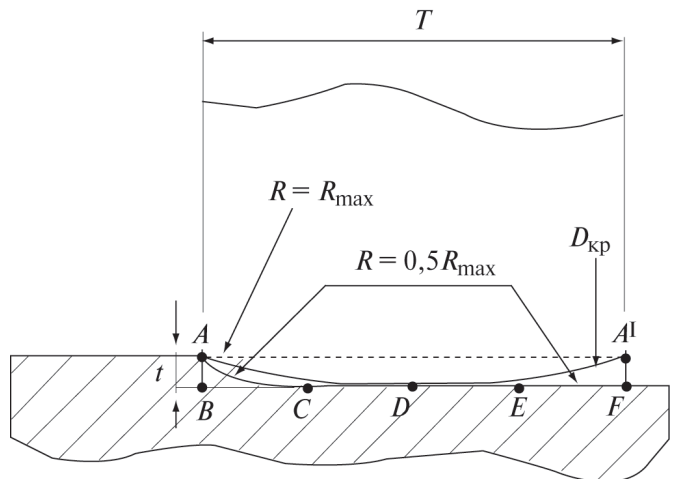


Рис. 2. Геометрическая модель профиля РП ШК

шлифования ( $t$ ). Текущие значения  $R$  задавались в долях от  $R_{\max}$ .

Для оценки степени изменения площади поверхности контакта инструмента с заготовкой в зависимости от износа ШК по ранее разработанной авторами методике [2] было осуществлено моделирование их взаимодействия с использованием САД-системы для режимов и схемы шлифования, соответствующих проведенному эксперименту (рис. 3, 4).

Текущие значения площади контакта  $F_T$  рассчитывались по формуле

$$F_T = F_0 \left( 1 + 0,12T \frac{R^{0,41}}{S_{\text{поп}}} \right),$$

где  $F_0$  — начальная площадь контакта (инструмент после правки),

$$F_0 = l_k S_{\text{поп}}.$$

Здесь  $l_k$  — длина дуги контакта ШК и заготовки,

$$l_k = \sqrt{D_{\text{кр}} t},$$

где  $D_{\text{кр}}$  — диаметр ШК.

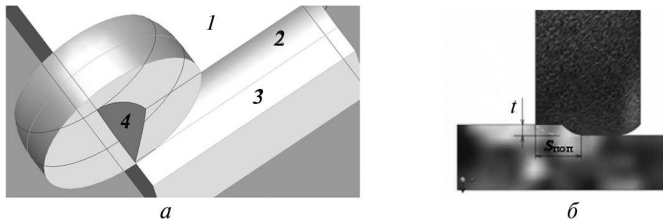


Рис. 3. 3D моделирование взаимодействия ШК с заготовкой:

$a$  — принципиальная схема ( $1$  — шлифуемая поверхность,  $2$  — поверхность резания,  $3$  — шлифованная поверхность,  $4$  — поверхность контакта инструмента с заготовкой);  $b$  — задание взаимного расположения ШК и заготовки с учетом глубины шлифования и поперечной подачи

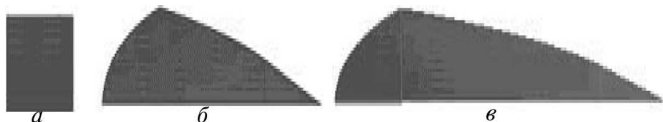


Рис. 4. Изображения смоделированных поверхностей контакта (вид сверху) РП ШК с заготовкой:

$a$  —  $R = 0$ , площадь поверхности  $6,32 \text{ мм}^2$ ;  
 $b$  —  $R = 0,5R_{\max}$ , площадь поверхности  $10,99 \text{ мм}^2$ ;  
 $c$  —  $R = R_{\max}$ , площадь поверхности  $12,38 \text{ мм}^2$

По результатам проведенного эксперимента получено представление о некоторых закономерностях изменения формы РП ШК в процессе шлифования и оценено влияние этого фактора на размеры площади контакта инструмента с заготовкой. Разработанная геометрическая модель изношенного профиля РП является универсальной для схем плоского и круглого шлифования периферией ШК и может использоваться, например, для определения текущих значений и динамики изменения температуры в зоне резания, показателей срезания активными зернами материала заготовки, процесса формирования шероховатости и макрогеометрических параметров шлифованной поверхности, силовых характеристик процесса.

#### Литература

- [1] Салов П.М. *Повышение эффективности заточки, круглого и плоского шлифования с продольной подачей*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 1998, 32 с.
- [2] Переладов А.Б., Кожевников И.В. Изучение геометрических параметров поверхности контакта шлифовального круга с заготовкой для схем круглого и плоского шлифования с использованием твердотельного моделирования. *Вестник Курганского университета. Сер. Технические науки*, 2005, вып. 2, с. 79—81.
- [3] Байкалов А.К. *Введение в теорию шлифования материалов*. Киев, Наукова думка, 1978, 208 с.
- [4] Маслов Е.Н. *Теория шлифования материалов*. Москва, Машиностроение, 1974, 320 с.
- [5] Подборнов И.В., Свищев В.И., Флегентов В.К. Геометрические параметры зоны контакта инструмента с деталью при плоском торцовом планетарном шлифовании. *Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009. Сб. статей Междунар. науч.-технич. конфер.* Волгоград, ВолГАСУ, 2010, с. 85—89.
- [6] Ларшин В.П. Компьютерное моделирование и исследование зоны контакта при профильном шлифовании. *Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009. Сб. статей Междунар. науч.-технич. конфер.* Волгоград, ВолГАСУ, 2010, с. 94—97.
- [7] Кошин А.А., Сопельцев А.В. Геометрия зоны шлифования и механика резания при обдирочном шлифовании. *Прогрессивные технологии в машиностроении. Сб. науч. тр.* Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2007, с. 148—153.
- [8] Ардашев Д.В., Кошин А.А. Уровень стохастичности эксплуатационных показателей шлифовальных кругов. *Прогрессивные технологии в машиностроении. Сб. науч. тр.* Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2007, с. 108—115.
- [9] Malkin S., Guo Ch. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York, Industrial Press Inc., 2008, 372 p.
- [10] Li X. *Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis*. A Dis. for the Degree of Doctor of Philosophy in Manufacturing Engineering. Worcester, 2010, 145 p. URL: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0517-10-102251/unrestricted/li.pdf> (accessed: 15 March 2013).
- [11] Шульц В.В. *Форма естественного износа деталей машин и инструмента*. Ленинград, Машиностроение, 1990, 208 с.

## References

- [1] Salov P.M. *Povyshenie effektivnosti zatochki, kruglogo i ploskogo shlifovaniia s prodol'noi podachei* Avtoreferat diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of grinding, round and flat grinding traverse. Abstract dr. tehn. sci. diss.]. Samara, 1998. 32 p.
- [2] Pereladov A.B., Kozhevnikov I.V. *Izuchenie geometricheskikh parametrov poverkhnosti kontakta shlifoval'nogo kruga s zagotovkoi dlia skhem kruglogo i ploskogo shlifovaniia s ispol'zovaniem tverdotel'nogo modelirovaniia* [The study of geometrical parameters of the grinding wheel surface contact with the workpiece for round and flat circuits grinding using solid modeling]. *Vestnik Kurganskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. Tekhnicheskie Nauki* [Herald Kurgan State University. Ser. Technical Sciences]. 2005, issue 2, pp. 79–81.
- [3] Baikalov A.K. *Vvedenie v teoriyu shlifovaniia materialov* [Introduction to the grinding of materials]. Kiev, Naukova dumka publ., 1978. 208 p.
- [4] Maslov E. N. *Teoriia shlifovaniia materialov*. [The theory of grinding materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974. 320 p.
- [5] Podbornov I.V., Svirshchev V.I., Flegentov V.K. *Geometricheskie parametry zony kontakta instrumenta s detal'iu pri ploskom tortsovom planetarnom shlifovanii*. [The geometrical parameters of the contact zone tool and the part with a flat machined planetary grinding]. *Protessy abrazivnoi obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy. Shlifabraziv-2009. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [The processes of abrading, abrasive tools and materials. Shlifabraziv-2009. Collected papers of the International Scientific and Technical Conference]. Volgograd, VolgGASU publ., 2010, pp. 85–89.
- [6] Larshin V. P. *Komp'yuternoe modelirovanie i issledovanie zony kontakta pri profil'nom shlifovanii* [Computer modeling and study of the contact zone in profile grinding]. *Protessy abrazivnoi obrabotki,*

*abrazivnye instrumenty i materialy. Shlifabraziv-2009. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [The processes of abrading, abrasive tools and materials. Shlifabraziv-2009. Collected papers of the International Scientific and Technical Conference]. Volgograd, VolgGASU publ., 2010, pp. 94–97.

[7] Koshin A.A., Sopel'tsev A.V. *Geometriia zony shlifovaniia i mekhanika rezaniia pri obdirochnom shlifovanii* [The geometry of the zone grinding and cutting mechanics in grinding, deburring]. *Progressivnyye tekhnologii v mashinostroenii. Sbornik nauchnykh trudov* [Advanced technologies in mechanical engineering. Collection of scientific papers]. Cheliabinsk, IuUrGU publ., 2007, pp. 148–153.

[8] Ardashev D.V., Koshin A.A. *Uroven' stokhastichnosti ekspluatatsionnykh pokazatelei shlifoval'nykh krugov* [The level of stochasticity operational performance of grinding wheels]. *Progressivnyye tekhnologii v mashinostroenii. Sbornik nauchnykh trudov* [Advanced technologies in mechanical engineering. Collection of scientific papers]. Cheliabinsk, IuUrGU publ., 2007, pp. 108–115.

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

[10] Li X. *Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis*. A Diss. for the Degree of Doctor of Philosophy in Manufacturing Engineering. Worcester, 2010, 145 p. Available at: URL: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-051710-102251/unrestricted/li.pdf> (accessed 15 March 2013).

[11] Shul'ts V.V. *Forma estestvennogo iznosa detalei mashin i instrumenta* [Form of natural wear of machine parts and tools]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1990. 208 p.

Статья поступила в редакцию 11.06.2013

## Информация об авторах

**ПЕРЕЛАДОВ Александр Борисович** (Курган) — кандидат технических наук, директор Технопарка Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, Гоголя ул., д. 25, e-mail: tp@kgsu.ru).

**КАМКИН Иван Павлович** (Курган) — аспирант, инженер Технопарка Курганского государственного университета (640669, Курган, Российская Федерация, Гоголя ул., д. 25, e-mail: 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).

## Information about the authors

**PERELADOV Aleksandr Borisovich** (Kurgan) — Cand. Sc. (Eng.), Director of Industrial Park. Kurgan State University (KSU, Gogolya str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: tp@kgsu.ru).

**KAMKIN Ivan Pavlovich** (Kurgan) — Post-Graduate, Engineer of Industrial Park. Kurgan State University (KSU, Gogolya str., 25, 640669, Kurgan, Russian Federation, e-mail: ipkamkin@gmail.com).

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