

УДК 621.922

DOI 10.22213/2413-1172-2017-4-13-17

А. Б. Переладов, кандидат технических наук, доцент, Курганский государственный университет

О. В. Дмитриева, кандидат технических наук, Курганский государственный университет

И. П. Камкин, кандидат технических наук, Курганский государственный университет

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОРЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Введение

Шлифование является одним из самых распространенных методов механической обработки, обеспечивающей высокую производительность удаления припуска и качество полученной поверхности. Однако проектирование режимно-инструментального оснащения операций шлифования осуществляется в большинстве случаев с использованием справочных таблиц и других источников информации, не учитывающих многие значимые факторы процесса шлифования, влияющие на его показатели и результаты обработки. Численные расчеты оптимальных режимов и характеристик инструмента на практике в реальном производстве не используются в связи с отсутствием адекватных универсальных математических зависимостей процесса шлифования. Кроме того, шлифование является процессом обработки, параметры которого испытывают значительные изменения в течение периода стойкости (время работы инструмента между двумя правками, силы шлифования и др.). Причинами этого являются: износ рабочей поверхности (РП) абразивного инструмента и изменение ее геометрической формы [1–3], затупление вершин режущих зерен, что приводит к изменению статистических показателей их распределения в объеме рабочего слоя шлифовального круга и размеров срезаемых стружек. Эти и другие показатели сегодня должным образом не исследованы и поэтому не учитываются при проектировании операций шлифования, определении параметров и результатов обработки деталей, хотя во многом определяют параметры взаимодействия инструмента с заготовкой и динамику их изменений.

Таким образом, исследование параметров взаимодействия шлифовального круга с учетом характеристик и текущих состояний рабочей поверхности инструмента и разработка расчетных методик является актуальной задачей.

Область, цель и задачи исследований

Определение параметров срезаемых стружек при шлифовании, количество срезов является основой для получения необходимых данных, позволяющих рассчитать показатели процесса обработки. Например, площадь и форма поперечного сечения срезаемых стружек во многом определяет силы, действующие на активные абразивные зерна со стороны шлифуемого материала [4–7]. Интегральные показатели процесса зависят от суммарного воздействия универсума вершин режущих абразивных зерен, одновременно находящихся в зоне контакта (ЗК) инструмента с заготовкой. Решение подобной задачи усложняется необходимостью рассмотрения и учета геометрических параметров ЗК шлифовального круга (ШК) с заготовкой [8], которые подвержены изменению. Кроме того, зерна, одновременно осуществляющие резание, находятся в различных стадиях внедрения в материал заготовки (начало резания, постепенное увеличение глубины резания и выход из контакта с заготовкой). Поэтому активные зерна осуществляют резание с различными длинами и глубинами, что предопределяется степенью их перекрытия другими зернами, высотой расположения в объеме рабочего слоя, формой и размерами ЗК инструмента с заготовкой [9]. Изменение формы РП инструмента, текущее ее состояние также является значимым фактором, влияющим на показатели микрорезания.

С учетом вышеизложенного были сформулированы цель и задачи исследований.

Цель исследований – разработка методики для определения показателей микрорезания в ЗК инструмента с заготовкой.

Задачи исследований:

– планирование и проведение эксперимента с использованием разработанной компьютерной модели взаимодействия шлифовального круга с заготовкой;

- определение дискретных и интегральных параметров микрорезания в зоне контакта рабочей поверхности инструмента с заготовкой;
- разработка методики расчета базовых показателей процесса шлифования.

Ход и основные результаты исследований

В ходе исследований было проведено изучение параметров микрорезания при взаимодействии ШК прямого профиля с заготовкой, работающего по схеме плоского многоходового шлифования с дискретной поперечной подачей с использованием разработанных средств и методик компьютерного моделирования. В частности были использованы статистико-вероятностные модели рабочей поверхности инструмента и его кинематического взаимодействия с заготовкой [10]. Данные модели были созданы с использованием инженерной 3D САПР T-FlexCAD и позволили определить форму и размеры сечения срезаемых стружек с учетом параметров режима шлифования и характеристик инструмента.

Изменение формы РП, определение текущих ее состояний в процессе изнашивания изучалось

ранее в ходе проведения лабораторного физического эксперимента в соответствии с разработанной методикой [11]. В частности в ходе эксперимента было выявлено изменение формы профиля шлифовального круга при износе и влияние данного фактора на параметры ЗК инструмента с заготовкой (рис. 1, 2).

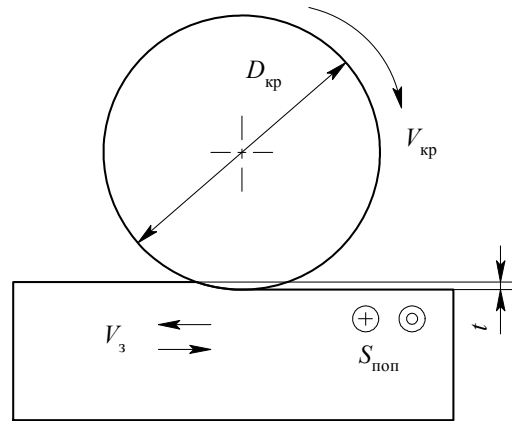


Рис. 1. Схема плоского шлифования: $D_{кр}$ – диаметр ШК; $V_{кр}$ – скорость вращения ШК; $V_з$ – продольная подача заготовки; $S_{поп}$ – поперечная (осевая) подача; t – технологическая (назначенная) глубина шлифования

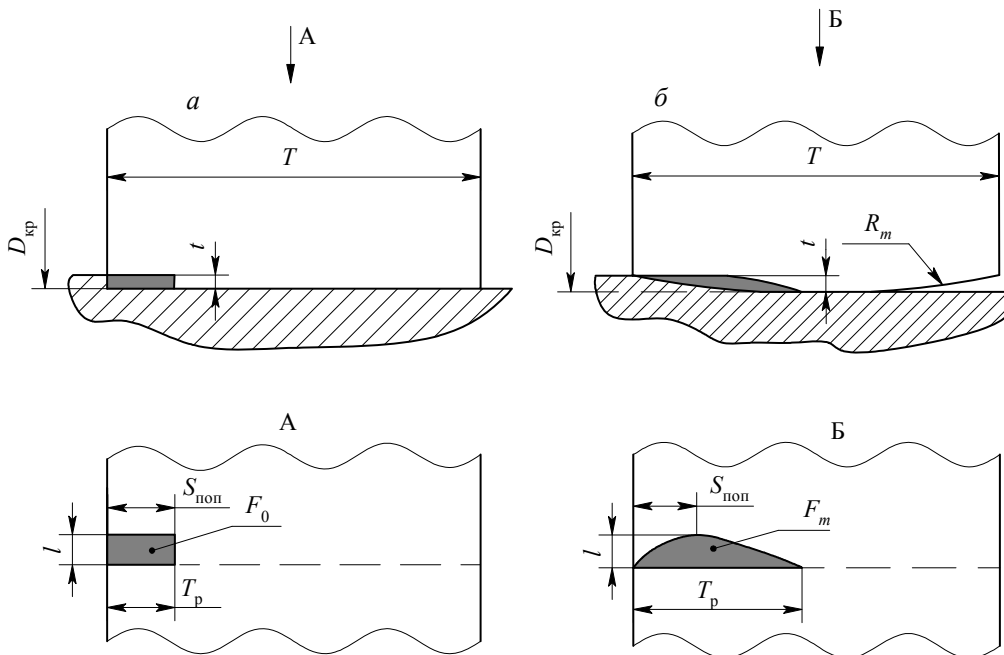


Рис. 2. Форма зоны контакта без износа РП ШК (а, вид А) и с износом (б, вид Б); виды зон контакта А и Б со стороны оси вращения ШК: T – высота ШК; R – радиус износа ШК; F_0 – площадь контакта ШК и заготовки при $R = 0$; F_m – площадь ЗК, при максимально изношенной РП ШК; l – длина ЗК; T_p – ширина ЗК

Вышеприведенные результаты исследований были использованы для проведения компьютерного моделирования процесса шлифования, расчетов и вывода математических зависимостей.

Компьютерное моделирование осуществлялось в следующем порядке. На первом этапе задавались исходные показатели элементов факторного пространства процесса плоского шлифования кругом прямого профиля (в качестве

примера): диаметр 300 мм, высота 5 мм, средний размер абразивных зерен 0,4 мм, номер структуры инструмента 6. Постоянные режимы шлифования имели значения: глубина шлифования (технологическая) 0,02 мм, поперечная подача 2 мм/ход.

Осевое сечение профиля рабочей поверхности инструмента в начальный период работы описывалось прямой (износ отсутствует, $R_0 = 0$), при наличии геометрического износа инструмента – дугой, имеющей радиус кривизны R_m , который рассчитывался по формуле

$$R_m = \frac{t^2 + 0,25T^2}{2t},$$

где T – высота шлифовального круга, мм.

Степенью износа профиля РП ШК определяли площадь и форму контакта инструмента с заготовкой в процессе шлифования в начале работы круга (F_0) и при изношенной рабочей поверхности (F_m). Текущая площадь ЗК при наличии износа рабочей поверхности рассчитывалась по формуле [12]

$$F_m = F_0 \left(1 + \frac{0,12T}{S_{\text{поп}}} \right).$$

Параметры микровзаимодействия абразивных зерен в ЗК (форма, размеры поперечного сечения стружки, плотность, число активных

зерен) определялись с использованием разработанной компьютерной программы кинематического моделирования процесса шлифования [13]. Определенные параметры микровзаимодействия использовались в дальнейшем при определении силовых показателей процесса обработки по методике, приведенной в [14].

В ходе исследований определяли и использовали в расчетах комплексный параметр γ , характеризующий удельную производительность (объем срезаемого материала) единицы площади рабочей поверхности инструмента [15]. Параметр γ учитывает схему, режим шлифования, геометрию РП инструмента и заготовки. Для вычисления средних значений параметра γ в ЗК инструмента с заготовкой использовались средние значения глубины шлифования $t_{\text{ср}}$, определенные по формуле

$$t_{\text{ср}} = 0,667t \frac{F_0}{F_m}.$$

Разработанный экспериментальный план 3^2 [16] предполагал исследование двух факторов (элементы режима шлифования $V_{\text{кр}}$ и V_3) на трех уровнях оценки определяемых параметров.

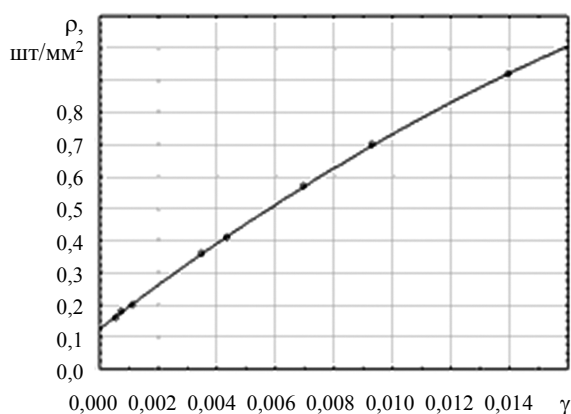
Изменяемые режимы шлифования и основные результаты компьютерного моделирования приведены в таблице.

Режимы шлифования и результаты компьютерного эксперимента

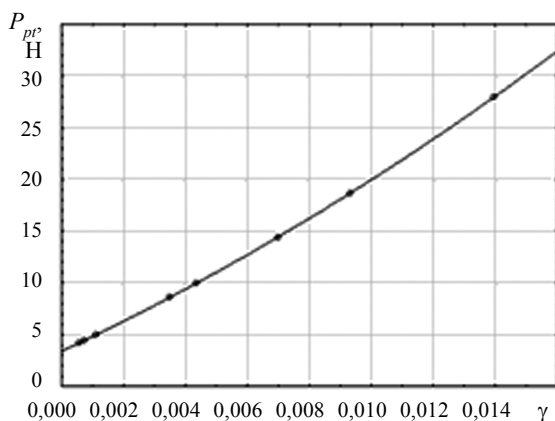
№ эксперим. точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость шлифования $V_{\text{кр}}$, м/с	20	20	20	30	30	30	40	40	40
Продольная подача заготовки V_3 , м/с	0,033	0,208	0,417	0,033	0,208	0,417	0,033	0,208	0,417
Начальная площадь ЗК F_0 , мм ²	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Текущая площадь ЗК при изношенном ШК F_m , мм ²	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37
Средняя глубина шлифования (в ЗК F_m) $t_{\text{ср}}$, мм	0,01026	0,01026	0,01026	0,01026	0,01026	0,01026	0,01026	0,01026	0,01026
Комплексный коэффициент (средний по ЗК F_m) γ	0,00112	0,00698	0,01396	0,00074	0,00465	0,00931	0,00056	0,00349	0,00698
Плотность активных зерен в зоне контакта ρ , шт./мм ²	0,2	0,57	0,92	0,18	0,43	0,7	0,16	0,36	0,57
Средняя площадь сечений срезаемых стружек $S_{\text{ср}}$, мкм ²	63,4	163	234	54,3	140	194	45,4	116	156
Количество активных зерен в зоне контакта N_3 , шт.	1,29	3,62	5,86	1,12	2,74	4,43	1,04	2,28	3,62
Средняя сила резания зерном P_p , Н	4,97	14,41	27,97	4,44	10,45	18,64	4,17	8,58	14,41
Сила процесса шлифования P_p , Н	6,4	52,14	163,9	4,99	28,65	82,59	4,35	19,56	52,14

Анализ результатов исследования

Обработка полученных экспериментом результатов заключалась в проведении регрессионного анализа с целью оценки влияния изменения исследуемых факторов на показатели взаимодействия инструмента с заготовкой. Для статистического анализа данных использовался программный пакет STATISTICA10. При проведении анализа в качестве обобщенного фактора рассмотренных элементов процесса шлифования использовался комплексный коэффициент γ . Ниже в качестве примера приведены полученные математические зависимости изученных параметров и графики их изменения.



а



б

Рис. 3. График зависимости плотности вершин активных зерен в ЗК ρ (а) и средних сил резания зернами P_{pt} (б) от изменения γ

Аппроксимация проводилась с использованием полинома второго порядка. Были получены следующие зависимости плотности вершин активных зерен в ЗК ρ и средних сил резания зернами P_{pt} от комплексного коэффициента γ :

$$\rho = 0,125 + 70\gamma + 936\gamma^2;$$

$$P_{pt} = 3,38 + 1398\gamma + 25987\gamma^2.$$

Обсуждение результатов, выводы

Благодаря использованию при проведении исследования параметров микрорезания, комплекса имитационных компьютерных и математических моделей инструмента и процесса обработки, было решено «основное уравнение шлифования» (впервые сформулировал Alden G. I. в начале XX в.) – определены площади поперечных сечений стружек, срезаемых вершинами абразивных зерен, в привязке к геометрической модели зоны контакта рабочей поверхности инструмента с заготовкой. Впервые предложено использование скорректированных значений комплексного параметра γ , характеризующего удельную производительность шлифования (объем срезаемого материала) единицей площади рабочей поверхности инструмента [17], с учетом изменения геометрии формы изношенной в процессе работы РП инструмента. В результате исследований с применением предлагаемой методики, разработанной на использовании базовых математических моделей, были определены дискретные и интегральные показатели микрорезания процесса абразивной обработки, необходимые, например, для расчета оптимальной прочности закрепления абразивных зерен на РП ШК и силовых показателей процесса шлифования.

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- спланирован и проведен компьютерный эксперимент с применением статистико-вероятностной модели взаимодействия шлифовального круга с заготовкой;
- получены данные о параметрах микрорезания с учетом стохастической неоднородности работы активных режущих кромок в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой;
- определены базовые дискретные и интегральные параметры микрорезания активными абразивными зернами заготовки, зависимость изменения параметров от элементов режима обработки для конкретных условий.

Библиографические ссылки

1. Шульц В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Л. : Машиностроение, 1990. 208 с.
2. Салов П. М. Повышение эффективности заточки, круглого и плоского шлифования с продольной подачей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 1998. 32 с.

3. 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. Серия «Технические науки». 2005. Вып. 2. С. 79–81.

4. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. Киев : Наук. думка, 1978. 208 с.

5. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М. : Машиностроение, 1974. 320 с.

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

7. Li X. Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis : A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Manufacturing Engineering. Worcester, 2010. 145 p. URL: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-051710-102251/unrestricted/li.pdf>

8. Переладов А. Б., Кожевников И. В. Указ. соч.

9. Переладов А. Б., Камкин И. П., Анохин А. В. Экспериментальное изучение износа рабочей поверхности шлифовального круга // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 11. 2013. С. 70–74.

10. Переладов А. Б., Камкин И. П. Моделирование процесса шлифования с использованием программного комплекса T-Flex // Зауральский научный вестник. 2013. Вып. 1(3). С. 30–33.

11. Переладов А. Б., Камкин И. П., Анохин А. В. Указ. соч.

12. Там же.

13. Переладов А. Б., Камкин И. П. Указ. соч.

14. Калинин Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Рыбинск, 2006. 34 с.

15. Переладов А. Б. Повышение эффективности операций шлифования путем направленного регулирования параметров рабочего слоя абразивного инструмента : дис. ... канд. техн. наук. Курган, 1998. 150 с.

16. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 278 с.

17. Переладов А. Б. Указ. соч.

References

1. Schultz V. V. (1990). *Forma estestvennogo iznosa detaley mashin i instrumenta*. [The form of normal wear of machine parts and tools]. Leningrad : Mashinostroyeniye, 208 p. (in Russ.).

2. Salov P. M. (1998). *Povyshenie effektivnosti zatochki, kruglogo i ploskogo shlifovaniya s prodol'noy podachey* [Improving the efficiency of sharpening, round and flat grinding with longitudinal feed], abstract of DSc thesis. Samara (in Russ.).

3. Pereladov A. B., Kozhevnikov I. V. (2005). *Vestnik Kurganskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki"* [Bulletin of the Kurgan University, Series "Technical Sciences"], iss. 2, pp. 79-81 (in Russ.).

4. Baikalov A. K. (1978). *Vvedenie v teoriju shlifovaniya materialov* [Introduction to the theory of grinding of materials]. Kiev : Naukova Dumka (in Russ.).

5. Maslov E. N. (1974). *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of grinding of materials]. Moscow : Mashinostroyeniye (in Russ.).

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

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

8. Pereladov A. B., Kozhevnikov I. V. (2005). Op.cit.

9. Pereladov A. B., Kamkin I. P., Anokhin A. V. (2013). *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye* [Bulletin of higher educational institutions. Mechanical engineering], no. 11, pp. 70-74 (in Russ.).

10. Pereladov A. B., Kamkin I. P. (2013). *Zaural'skiy nauchny jvestnik*. [TRANS-Ural scientific Bulletin], iss. 1(3), pp. 30-33 (in Russ.).

11. Pereladov A. B., Kamkin I. P., Anokhin A. V. (2013). Op.cit.

12. Ibid.

13. Pereladov A. B., Kamkin I. P. (2013). Op. cit.

14. Kalinin E. P. (2006). *Teoriya i praktika upravleniya proizvoditel'nost'yu abrazivnoy obrabotki s uchetoм zatupleniya instrumenta* [Theory and practice of performance management of abrasive processing depending on tool dulling], abstract of DSc thesis (in Russ.).

15. Pereladov A. B. (1998). *Povyshenie effektivnosti operaciy shlifovaniya putem napravlennoгo regulirovaniya parametrov rabocheгo sloya abrazivnoгo instrumenta* [Improving the efficiency of grinding operations by directed adjustment parameters of the working layer of an abrasive tool], abstract of DSc thesis. Kurgan (in Russ.).

16. Adler Ju. P., Markova E. V., Granovsky Ju. V. (1976). *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nyh usloviy* [Planning an experiment in search of optimum conditions]. Moscow : Nauka (in Russ.).

17. Pereladov A. B. (1998). Op.cit.