

# Технология и технологические машины

УДК 621.921

## Методика экспериментального определения геометрических параметров абразивных зерен

**А.П. Осипов, В.В. Федотов**

*Рассмотрены теоретические и практические аспекты методики определения предложенных авторами геометрических параметров абразивных зерен. Приведена сравнительная оценка результатов предварительных исследований, показана возможность использования результатов в теории шлифования.*

**Ключевые слова:** геометрия абразивного зерна, автоматизированная методика, модель вершины абразивного зерна, радиус вершины, угол при вершине.

## Experimental procedure to determine abrasive grain geometrical parameters

**A.P. Osipov, V.V. Fedotov**

*Theoretical and practical aspects of the experimental procedure to determine the proposed abrasive grain geometrical parameters are considered. The comparative assessment of tentative experimental results is presented. The possibility for applying the results in grinding theory is discussed.*

**Keywords:** abrasive grain geometry, automatic procedure, abrasive grain corner model, corner radius, corner angle.

Форма абразивных зерен, используемых для изготовления шлифовальных инструментов, как и вершин абразивных зерен, изменяется в широком диапазоне, что оказывает значительное влияние на их прочностные и режущие свойства, эффективность процесса шлифования в целом.



**ОСИПОВ**

**Александр Петрович**  
кандидат технических  
наук, доцент,  
зав. кафедрой «Технология  
машиностроения»



**ФЕДОТОВ**

**Виктор Васильевич**  
старший преподаватель  
кафедры «Технология  
машиностроения»  
(ФГБОУ ВПО «Самарский  
государственный  
технический университет»,  
филиал в г. Сызрани)  
e-mail: tms10@yandex.ru

В теории шлифования вершину абразивного зерна моделируют объемной фигурой: сфера и конус с округленной вершиной [1–3]; параболоид вращения [4, 5]; треугольная пирамида [6, 7]; совокупность призм или цилиндров [8, 9]. Устоявшейся моделью следует считать конус с округленной вершиной, которая описывается радиусом округления вершины  $\rho$  и углом при вершине  $\varepsilon$ . Методика определения геометрических параметров абразивных зерен хорошо описана Д.Б. Ваксером [10]. Суть методики заключается в том, что навеска абразивных зерен помещается на стол микроскопа, при этом абразивные зерна стремятся расположиться относительно опорной поверхности таким образом, чтобы расстояние от центра масс до поверхности было минимальным. Затем абразивные зерна фотографируются или обрисовываются. Исследователь выбирает 3–5, режущих по его мнению, элементов и по шаблону (или иным способом) определяет для этих элементов параметры  $\rho$  и  $\varepsilon$ . Основываясь на данной методике, ряд исследователей проводили эксперименты по определению радиуса  $\rho$  и угла  $\varepsilon$ . Однако, на наш взгляд она, она имеет недостатки: во-первых, параметры  $\rho$  и  $\varepsilon$  описывают лишь единственную форму вершины абразивного зерна в виде конуса с округленной вершиной; во-вторых, оценивается плоская проекция абразивного зерна без учета глубины внедрения его в обрабатываемый материал и направления движения рабочей части зерна; в-третьих, параметры рабочей части зерна определяются 3–5-ю его возможными макроэлементами, которые выбираются субъективно. Поскольку при увеличении количества обсчитываемых элементов резко возрастает трудоемкость исследования, требуется автоматизация процесса.

Таким образом, целью работы является разработка автоматизированной методики экспериментального определения геометрических параметров абразивных зерен в рамках моделирования их рабочих частей широким классом фигур.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд следующих задач:

- разработать способ ориентации абразивных зерен в образце, исключающий влияние

силы тяжести и определяющий возможность их свободного пространственного расположения;

- собрать лабораторную установку для реализации методики;
- разработать математический аппарат, позволяющий определять зависимости геометрических параметров абразивных зерен от глубины внедрения;
- протестировать методику при исследовании реальных образцов навесок абразивных зерен.

На первом этапе исследования проводилось проектирование и изготовление образцов, моделирующих разноориентированное расположение абразивных зерен подобно положению их в структуре абразивного инструмента.

Важным фактором, определяющим положение единичной вершины абразивного зерна на рабочей поверхности шлифовального круга, является наличие связующего вещества. Первоначально были изготовлены образцы с использованием в качестве связки стеарина белого цвета. Технология изготовления образца заключалась в плавлении связующего в муфельной печи «Туллячка», введении в него навески абразивного материала, перемешивании и отверждении.

Предварительные исследования на металлографическом микроскопе показали, что абразивные зерна утоплены в связку, поэтому провести запись полного контура зерен не представлялось возможным. Использование в качестве связующего прозрачного геля также не дало положительных результатов из-за значительного искажения изображения в силу преломления света на различных участках.

Опытным путем было установлено, что необходимо насыпать абразивные зерна на поверхность расплавленного связующего. Зерна при этом располагались хаотично по площади образца и занимали произвольное пространственное положение. Дальнейшая работа по совершенствованию образцов позволила разработать более простую технологию их изготовления с одновременной возможностью проведения исследований в проходящем свете. Для этого навеска абразивных зерен насыпалась на отрезок прозрачного скотча, который затем закреплялся на предметном стекле. При этом тщательно следили за отсутствием отпечатков и загрязнений на липкой поверхности скотча.

Для проведения экспериментов с изготовленными образцами была собрана экспериментальная установка на основе микроскопа «Микромед-2». Микроскоп был дополнительно оборудован видеоокуляром и программным обеспечением, установленным на персональный компьютер, а также комплектом визуализации, включающий в себя цифровую камеру (в нашей комплектации — Canon PowerShot A650) с 3-кратным оптическим увеличением и оптический адаптер для цифровой камеры. Достоинством микроскопа «Микромед 2» является наличие револьверного устройства на четыре объектива и возможность микрометрического регулирования расстояния от объектива до предметного стола.

Поскольку общее увеличение системы зависит от расстояния от передней фокальной плоскости до объекта и расстояния от задней фокальной плоскости до матрицы фотокамеры, которые нам неизвестны, разрешение оптической системы определялось экспериментально. Для этого фотографировалось изображение меры длиной в 200...1 000 мкм в зависимости от среднего размера зерна выбранной зернистости (рис. 1).

Увеличение фотокамеры задавалось либо программно, либо определялось по данным записи файла фотографии через текущее фокусное расстояние для заданного снимка с помощью графического редактора. Разрешение оптической системы пересчитывалось в пикс/мкм и записывалось в файл. В настоящих исследованиях для зернистостей 12—100 она составила 0,223...0,893 пикс/мкм, что позволило даже при минимальной глубине исследования 0,05 от размера абразивного зерна получить на контуре 5—9 точек соответственно.

Случайность ориентации зерен в образцах проверялась при наведении на резкость ближних и дальних участков зерен (рис. 2). На фотографии хорошо видно, что пластинчатое зерно расположилось главной осью перпендикулярно плоскости наблюдения. Замеры на микрометрическом устройстве показали разность высот наблюдения 387 мкм. Более половины зерен на образце оказались ориентированными подобным образом.

Для исследования были отобраны зерна электрокорунда марки 14А зернистостей

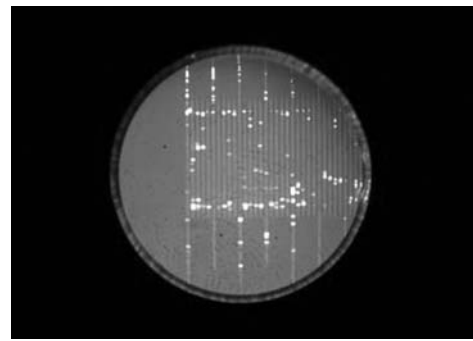


Рис. 1. Объект — микрометр( $\times 10$ )

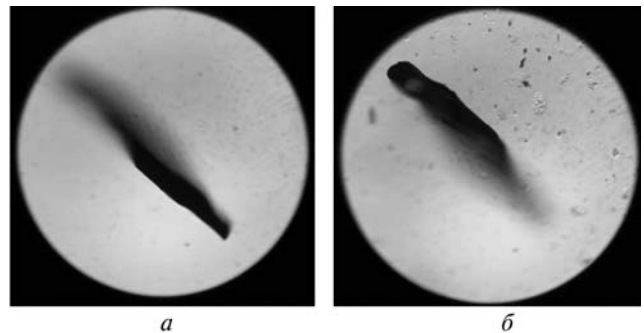


Рис. 2. Зерно карбида кремния зеленого 63С, зернистость 63 ( $\times 10$ ):

*a* — верхняя граница; *б* — нижняя граница

20—125 производства Челябинского абразивного завода, карбида кремния зеленого 63С и карбида кремния черного 53С зернистости 16—50 производства Волжского абразивного завода. Полученные материалы были промыты и очищены от примесей магнитным способом.

В результате фотографирования была создана база из 1 500 фотографий абразивных зерен (рис. 3).

Обработка изображений и определение среднестатистических характеристик рабочей части зерна проводились с помощью программы «Исследователь абразивных зерен V1.5», которая была разработана на кафедре «Технология машиностроения». Данная программа позволяет автоматически выделять контур зерна и при необходимости корректировать его вручную, если некоторые участки изображения оказались недостаточно четкими, после чего автоматически определяет координаты всех точек контура и располагает систему координат, увязывая ее с положением контура зерна. В программе определялись в том числе, следующие параметры:  $b_p$ ,  $v_p$ ,  $\rho$ ,  $\varepsilon$  (рис. 4) по 360 поло-

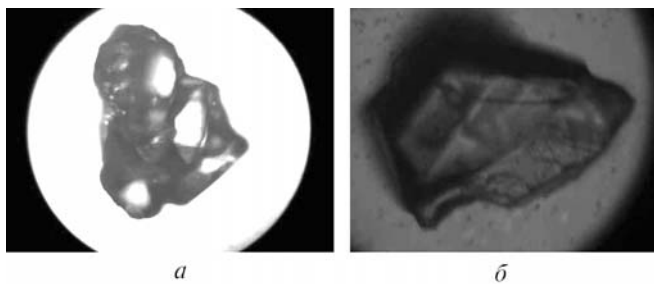


Рис. 3. Фотографии зерен:

*a* — зерно карбида кремния зеленого 63С, зернистость 40 (×20); *б* — зерно карбида кремния черного 53С, зернистость 12 (×40)

жениям плоской проекции зерна при вращении его вокруг центра масс отдельно для левой и правой сторон (720 массивов данных).

Параметры  $v_p$  и  $b_p$  определяют форму вершины абразивного зерна при ее моделировании широким классом фигур [11]. Математическая модель рабочей части зерна представляется в этом случае параболоидом вращения  $x^2 + y^2 = b_p z^{2v_p}$  (см. рис. 4), где  $z$  — глубина внедрения зерна в обрабатываемую поверхность. Ось  $z$  направлена от вершины вглубь зерна, нормально к обрабатываемой поверхности.

Расчет параметров рабочей части зерна  $b_p, v_p$  выполнялся методом наименьших квадратов:

$$b_p n + v_p \sum_{i=1}^n \ln(y_i) = \sum_{i=1}^n \ln(z_i);$$

$$b_p \sum_{i=1}^n \ln(y_i) + v_p \sum_{i=1}^n \ln(y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \ln(y_i) \ln(z_i),$$

где  $n$  — количество точек контура;  $z_i, y_i$  — координаты точек контура вершины зерна в рассматриваемой системе координат.

Определение угла при вершине  $\varepsilon$  для заданной глубины исследования заключается в аппроксимации левой и правой части вершины зерна прямыми вида  $y = k_l z + C_l, y = k_{np} z + C_{np}$  и вычисления угла между ними:

$$\varepsilon = 180^\circ - \arccos \frac{|k_l k_{np} + 1|}{\sqrt{1 + k_l^2} \sqrt{1 + k_{np}^2}}.$$

Радиус единичной неровности для  $i$ -го уровня исследования рассчитывается по формуле

$$\rho_i = \frac{c_i^2}{8z_i} + \frac{z_i}{2}$$

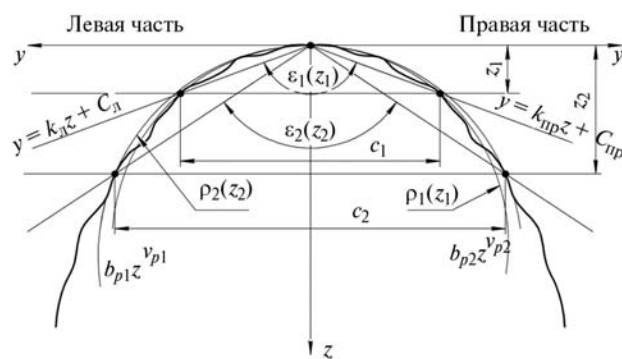


Рис. 4. Аппроксимация левой и правой части вершины абразивного зерна:

$\varepsilon$  — угол при вершине;  $\rho$  — радиус вершины;  $b_p, v_p$  — параметры аппроксимации вершины параболоидом вращения;  $k_{np}, k_l, C_{np}, C_l$  — коэффициент и постоянная в уравнении аппроксимации соответственно правой или левой части контура зерна прямой линией;  $y, z$  — координаты;  $z_i$  — глубина исследования на  $i$ -м уровне исследования;  $c_i$  — ширина контура зерна на  $i$ -м уровне исследования

и затем усредняется по всем значениям уровней  $j$  до уровня  $i$ :

$$\rho_i = \sum_{j=1}^i \rho_j.$$

Результаты предварительных исследований основных геометрических параметров абразивных зерен по разработанной методике для зернистости 40 представлены в таблице.

Значения полученных результатов многократно превышают данные Д.Б. Ваксера по радиусу при вершине и в 1,2—1,5 раза — по углу при вершине. Данный факт объясняется оценкой в исследовании всего контура абразивного зерна, включая плоские кромки, а не 3—5 острых макроэлементов, которые выбираются исследователем.

Предварительными исследованиями установлено, что параметры  $\rho$  и  $\varepsilon$  изменяются с глубиной исследования: это изменение составляет 25% для угла и 22...27% для радиуса в пределах максимальной рабочей глубины. Максимальный радиус вершины зерна закономерно пропорционален средневероятному размеру зерна (зернистости). Однако, минимальные размеры радиусов при вершине не зависят от зернистости и марки абразивного материала. На зернах зафиксированы плоские кромки с радиусом округления вершины до 10...70 мкм, которые не были отражены в исследованиях других авторов.



Результаты исследований параметров  $\rho$  и  $\varepsilon$

Наименование абразивного материала (зернистость)	По методике авторов		Данные Д.Б. Ваксера [10]	
	$\rho$ , мм	$\varepsilon$ , град	$\rho$ , мм	$\varepsilon$ , град
Электрокорунд 14А (40)	$\frac{0,174 - 0,211}{0,002 - 0,039}$	126—160	0,029	114
Карбид кремния черный 53С (40)	$\frac{0,155 - 0,181}{0,005 - 0,037}$	123—154	0,031	110
Карбид кремния зеленый 63С (40)	$\frac{0,171 - 0,215}{0,003 - 0,042}$	128—154	0,027	105

*Примечание.* Для радиуса в числителе даны пределы изменения среднего значения, в знаменателе — пределы изменения минимального значения. Для угла приведены пределы изменения среднего значения.

## Выводы

1. Разработана методика экспериментально-определения геометрических параметров абразивных зерен, основанная на получении контура зерен в проходящем свете с ориентацией их в образце, позволяющая исключить влияние силы тяжести на пространственное расположение абразива.

2. Создана лабораторная установка для реализации разработанной методики.

3. Разработан математический аппарат для расчета геометрических характеристик абразивных зерен.

4. Предварительными исследованиями установлено, что данные по средним значениям параметров  $\rho$  и  $\varepsilon$ , описывающим традиционную для шлифования модель конуса с округленной вершиной, хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований для острых вершин. Этот факт дает основание говорить об адекватности разработанной методики эксперимента.

5. Предварительным анализом установлено, что  $\rho$  и  $\varepsilon$  — параметры изменчивые, соответственно как основные геометрические характеристики правильнее будет определять параметры, которые не изменяются в зависимости от глубины исследования и позволяют моделировать рабочую часть зерна широким классом фигур, а именно,  $v_p$  и  $b_p$ .

Дальнейшие исследования будут направлены на получение результатов по оценке комплекса геометрических параметров абразивного зерна и

его рабочих частей, а также составление нормативных баз данных для использования в инженерных расчетах.

## Литература

1. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании. М.: Машиностроение-1, 2004. 144 с.
2. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 172 с.
3. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 248 с.
4. Обеспечение формирования поверхностного слоя конструкционной керамики на основе имитационного моделирования процессов алмазного шлифования. А.С. Корниенко. Автореферат магистерской дис. Донецк: ДонНТУ, 2004. Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2004/mech/korniyenko/diss/index.htm>, свободный. Загл. с экрана.
5. Осипов А.П. К вопросу расчета сил при резании единичным абразивным зерном // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2004. № 24. С. 144—151.
6. Никифоров И.П. К вопросу о геометрии абразивного зерна // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2006. № 9. С. 65—68.
7. Никифоров И.П. Стохастическая модель процесса шлифования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2003. № 6. С. 64—72.
8. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1977. 263 с.
9. Степанов Ю.С., Щадрин И.Ф., Поляков А.И. Имитационное моделирование процесса внутреннего шлифования сборным комбинированным инструментом // Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 6. С. 33—35.
10. Ваксер Д.Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. М.-Л.: Машиностроение, 1964. 123 с.
11. Осипов А.П. Моделирование шероховатой поверхности методом суперпозиции относительных опорных кривых // Вестник Сам. гос. тех. ун-та. Сер. Физико-математические науки. 2002. С. 168—175.

Статья поступила в редакцию 13.09.2012