

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 621.963

doi:10.21685/2072-3059-2021-1-8

Геометрические характеристики частиц порошка для гидроабразивной обработки

А. Е. Зверовщиков¹, Г. Г. Лебедев², П. А. Гурин³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹azwer@mail.ru, ²normatechnology@gmail.com, ³sbgurin_pavel@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Моделирование взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой деталью при гидроабразивной обработке является важным этапом при технологической подготовке производства. От точности аппроксимации формы зерна абразивного порошка зависит результат моделирования его поведения при контактных взаимодействиях. Целью работы является формирование геометрических характеристик для создания усредненной модели частицы в САЕ-системах. *Материалы и методы.* При проведении экспериментов в качестве основной рабочей среды применялся абразив GMA 80 MESH ТУ 3986-00176245879–2011 зернистостью основной фракции 0,8 мм. При компьютерном моделировании использовалась программа ПО АСКОН «Компас 3D». *Результаты.* Описание геометрии частиц абразива позволяет получить исходные данные для моделирования гидроабразивной обработки в САЕ-системах, создавая предпосылки прогнозирования результатов обработки. Кроме того, появляется возможность объективного сравнения различных видов и составов абразивных материалов. *Выводы.* Проведена оценка геометрических характеристик частиц режущего материала для гидроабразивной обработки при подготовке моделирования в САЕ-системах. Построена усредненная модель частицы, аппроксимирующая реальные зерна абразивной среды. Определены критерии оценки возможности абразивного резания. Предложено использование методики оценки для порошковых материалов, применяемых в металлургии.

Ключевые слова: абразивные материалы, порошковые материалы, зерна, гидроабразивная обработка, частицы, модель

Для цитирования: Зверовщиков А. Е., Лебедев Г. Г., Гурин П. А. Геометрические характеристики частиц порошка для гидроабразивной обработки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 1. С. 84–92. doi:10.21685/2072-3059-2021-1-8

Geometrical characteristics of powder particles for hydroabrasive treatment

A.E. Zverovshchikov¹, G.G. Lebedev², P.A. Gurin³

© Зверовщиков А. Е., Лебедев Г. Г., Гурин П. А., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia¹azwer@mail.ru, ²normatechnology@gmail.com, ³sbgurin_pavel@list.ru

Abstract. *Background.* Modeling the interaction of abrasive grain with the workpiece during hydroabrasive treatment is an important stage in the technological preparation of production. The accuracy of the approximation of the grain shape of the abrasive powder depends on the result of modeling its behavior in contact interactions. The purpose of this work is to form geometric characteristics for creating an average model of a particle in SAE systems. *Materials and methods.* During the experiments, GMA 80 MESH abrasive TC 3986-00176245879-2011 with a grain size of the main fraction of 0.8 mm was used as the main working medium. The computer simulation program “Kompas 3D” was used for ASCON. *Results.* Description of the geometry of abrasive particles allows you to obtain initial data for modeling hydroabrasive treatment in CAE systems, creating prerequisites for predicting processing results. In addition, it is possible to objectively compare different types and compositions of abrasive materials. *Conclusions.* The estimation of geometrical characteristics of the particles of cutting material for hydroabrasive treatment in the preparation of the simulation in the CAE-systems. An averaged particle model is constructed that approximates the real grains of the abrasive medium. Criteria for evaluating the possibility of abrasive cutting are defined. The use of estimation methods for powder materials used in metallurgy is proposed.

Keyword: abrasive materials, powder materials, grains, hydroabrasive treatment, particles, model

For citation: Zverovshchikov A.E., Lebedev G.G., Gurin P.A. Geometrical characteristics of powder particles for hydroabrasive treatment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;1:84–92. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-1-8

Введение

Порошковые материалы нашли широкое применение в различных областях машиностроения. Они используются как обрабатывающие среды, технологическое сырье, конструктивные элементы, вспомогательные элементы. Порошковые материалы в технологическом процессе ведут себя как гетерогенные среды. Их поведение определяется определенными физико-механическими, теплотехническими и иными свойствами. К порошковым материалам можно отнести абразивные среды, используемые для обработки свободным абразивом, которые при моделировании процесса резания рассматриваются как режущий инструмент, а при формовании абразивного инструмента на различных видах связки – как технологическая среда. Характеристики среды в последнем случае будут аналогичны характеристикам порошковых материалов, применяемых для порошковой металлургии и PIM-процессов, и должны отвечать требованиям, в основном касающимся внутреннего трения, вязкости и текучести гетерогенной среды. Эти характеристики в большой степени зависят от формы зерна, профиля его поверхности. Эти же параметры определяют режущие возможности зерна при абразивной обработке.

При технологической подготовке производства, включающего в себя операцию гидроабразивной обработки, важно смоделировать статические и динамические процессы взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой деталью. В процессе проектирования технологии с использованием порошковых материалов также необходимо моделировать поведение элементов гетерогенной среды, например, при движении в потоке жидкости или газа.

От точности аппроксимации формы зерна абразивного порошка зависит результат моделирования контактного взаимодействия. Подобные задачи успешно решаются в САЕ-системах [1].

Очень часто при моделировании динамики частиц гетерогенных сред прибегают к упрощению формы зерна до сферической [2]. Это допущение существенно облегчает расчет при помощи известных методик (например, для абразивного резания), имеет крайне поверхностное обоснование, снижает вероятность получения адекватных результатов моделирования, так как при динамическом моделировании потока гетерогенных сред в САЕ-системах [1] степень адекватности моделирования определяется полнотой исходных данных и уровнем достоверности принятых при моделировании допущений. Поэтому задача моделирования формы частиц свободного абразива является актуальной.

Частицы порошков имеют сложную форму, отклонения которой от сферичности отличаются в такой степени, что применить какую-либо методику оценки подобного отклонения затруднительно. Также крайне неточной является аппроксимация частиц известными геометрическими фигурами – тетраэдром, октаэдром и т.п. [2]. При таких методах моделирования не обеспечивается возможность учета формы и профиля поверхности частиц.

На сегодня имеются стандарты¹, регламентирующие фракционный состав абразивных материалов. Однако решение аэродинамической, теплотехнической задачи или задачи твердотельного взаимодействия при резании материалов на основе моделирования, например методом конечных элементов, требует гораздо больше исходных данных и информации о частице.

Известны попытки разработки уникальных геометрических тел для описания выступа абразивной частицы профиля шлифовального инструмента, например, вариационный многогранник, ребра которого являются дугами различного радиуса [3]. Однако методика, приведенная в этой работе, пригодна только для моделирования единичного выступа. Аналогичная методика и для описания геометрии свободных дискретных частиц, в том числе абразивных сред [4].

1. Методика экспериментальных исследований

Для свободного абразивного зерна в качестве модели, пригодной для расчетов, наиболее актуальным было признано создание двумерного профиля абразивной частицы и формирование количественных характеристик его оценки.

При проведении исследования отобрана случайная выборка абразивных частиц. Область фотографирования определялась таким образом, чтобы число зерен не превышало 10 в кадре, а разрешение снимка позволило увидеть контуры частиц. Снимок в серых тонах (Grayscale (8-bit)) предпочтителен для анализа, но возможна работа и в 8-битном цвете RGB. Для оценки размера использован эталон в виде сферы сопоставимого размера (рис. 1).

Для фотосъемки использован микроскоп Биомед-ММР2. Для микроскопа с измерительной шкалой возможно отсутствие эталона, однако точность анализа ухудшается вследствие дисторсии.

¹ ГОСТ 6613–86. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Введ. с 01.01.1988.

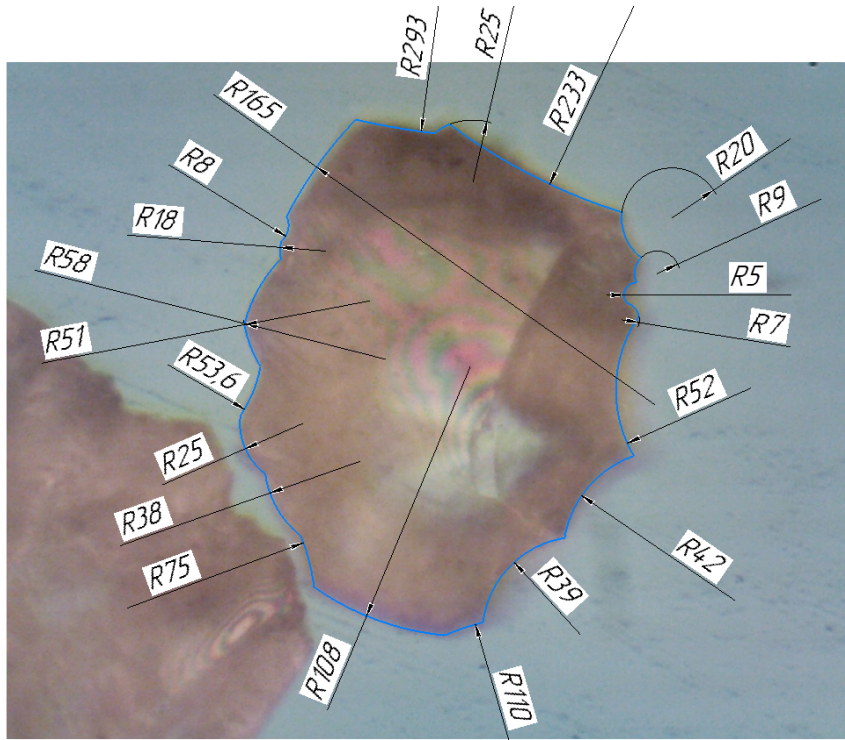


Рис. 1. Контур частицы свободного абразивного материала, аппроксимированный дугами (50-кратное увеличение)

Полученная фотография после импорта в файл формата любой CAD-системы, например Компас 3D, обрабатывалась путем оконтуривания изображений зерен на импортированном изображении дугами. Также возможно использование кривых более высокого порядка. При аппроксимации дугами аппарат оценки геометрии будет значительно проще.

Требуемая точность аппроксимации, с одной стороны, ограничена трудоемкостью работ, с другой – необходимой точностью моделирования. Как показал опыт моделирования гидроабразивной обработки, отклонения реального контура, вычерченного с точностью, достижимой по изображению в пределах 10–12 % от линий разработанной модели, являются допустимыми.

2. Статистическая обработка результатов и анализ технологических характеристик частицы

Далее выполнялась обработка массива размеров дуг, позволяющая получить количественную оценку геометрии контура. Различие для выпуклых и вогнутых участков контура учитывалось знаком при номинале дуги.

Пример количественной оценки выборки частиц абразивного материала представлен на рис. 2.

Для полной оценки профиля используются следующие параметры:

- 1) средний радиус вогнутых (отрицательных) дуг $\bar{R}_{\text{вог}}$;
- 2) средний радиус выпуклых (положительных) дуг $\bar{R}_{\text{вып}}$;
- 3) параметры распределения указанных величин.

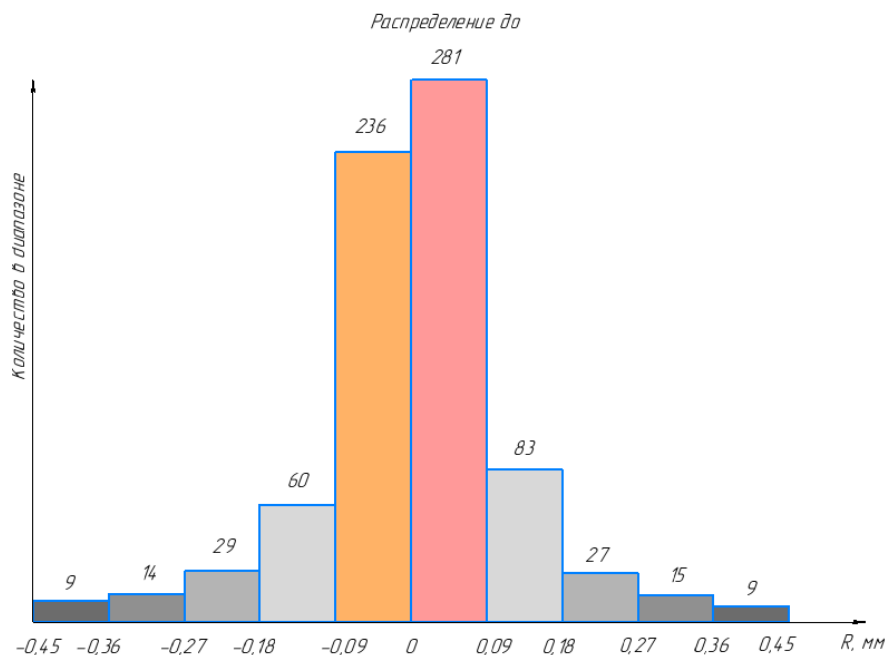


Рис. 2. Гистограмма выборки дуг контура для выборки абразивных частиц

Статистические данные предназначены для формирования массива размеров частиц при моделировании. Известными способами данная задача не могла быть решена в полной мере.

Основной задачей является оценка режущей способности профиля абразивной частицы. Термин режущей способности «острота рельефа», или агрессивность, известен для описания абразивной среды [5], однако переход к количественной оценке поверхности отдельной частицы до сих пор не произошел. Оценка абразивных характеристик профиля зерен проверена в известных работах [4], но методика и полученные исходные данные мало пригодны для построения профиля, что не позволило смоделировать реальное зерно для компьютерных систем.

Критерием режущей способности или агрессивности профиля для частицы абразива может служить частота распределения минимальных выпуклых (положительных) радиусов $\bar{R}_{\text{вып}}$. Такие участки профиля согласно классическому подходу к описанию процессов абразивного резания [6] внедряются в обрабатываемую поверхность под воздействием меньших внешних сил, действующих на зерно. Назовем этот критерий «показателем возможности абразивного резания». Для вычисления критерия необходимы диапазон усилий взаимодействия частицы с обрабатываемой поверхностью, физико-механические характеристики абразивного материала и радиус внедряемой частицы. Последний параметр предлагается заменить величиной выпуклых (положительных) радиусов $\bar{R}_{\text{вып}}$. Наличие выступов с радиусами, обеспечивающими возможность внедрения в обрабатываемую поверхность при известном диапазоне сил и прочностных свойствах обрабатываемого материала, и доля таких выступов в профиле абразивной частицы могут служить показателем возможности абразивного резания.

Для порошковых материалов, используемых при формовании изделий, наиболее весомым показателем, определяющим текучесть среды, содержащей порошковый материал, будет отклонение формы его частиц от сферичности.

Известные методы оценки сферичности частиц (ISO 3290, ISO 4291), оценки отклонений от сферической формы не могут использоваться для частиц абразива в свободном состоянии по причине существенных отличий формы частиц от сферической формы, что делает методику расчета невозможной по причине отсутствия базовой идеальной сферы.

По предлагаемой методике возможно оценить отклонения от сферичности исследуемой частицы по контуру двумерного профиля, а именно по размаху величины выпуклой дуги $WR_{\text{вып}}$.

Зерно полностью сферично с учетом отклонений методики при

$$\bar{R}_{\text{вып}} = \text{const} . \quad (1)$$

Оценка сферичности частиц для ряда аддитивных технологий предполагает недопустимость наличия на контуре дуг с отрицательными значениями радиусов.

Кроме того, показателем несферичности является дисперсия:

$$S_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{R}_3 - R_i)^2 , \quad (2)$$

где $\bar{R}_3$ – средний радиус зерна; R_i – радиус i -го участка контура; n – число участков контура;

$$\bar{R}_3 = (D_{\text{max}} + D_{\text{min}}) / 4 ,$$

здесь D_{min} – диаметр вписанной окружности зерна; D_{max} – диаметр описанной окружности зерна.

Зерно может считаться сферой при $R = R_i = \text{const}$ и $S_R = 0$.

В известных методиках микроскопического контроля производится замер поперечника зерна по двум координатам. Однако для моделирования требуется значительно больше информации. В предлагаемой методике через три наиболее удаленные точки построенного дугами контура проводится описанная окружность диаметром D_{max} .

Также строится вписанная окружность, методика построения которой может быть многовариантна, но есть возможность реализовать ее построение встроенными средствами CAD-системы при полуавтоматическом выборе координат точек построения. Тогда процедура будет рандомной, что обеспечивает статистическую значимость диаметра вписанной окружности D_{min} .

По полученным статистическим данным (диаметры вписанной и описанной окружностей зерна, средние радиуса вогнутых и выпуклых дуг), создается компьютерная модель частицы с усредненными геометрическими параметрами поверхности, а в дальнейшем, с учетом выявленного закона распределения, – массив моделей зерен, аппроксимирующих среду. При помощи генератора случайных чисел определяется количество выпуклых и вогнутых

дуг и порядковый номер удаляемых дуг. Далее формируется контур зерна. После построения в большинстве случаев необходимо удалить избыточные сегменты. Модель, соответствующая усредненной реальной частице, пригодна для моделирования взаимодействия частиц с поверхностью или между собой, которое позволяет прогнозировать результат этого взаимодействия (рис. 3).

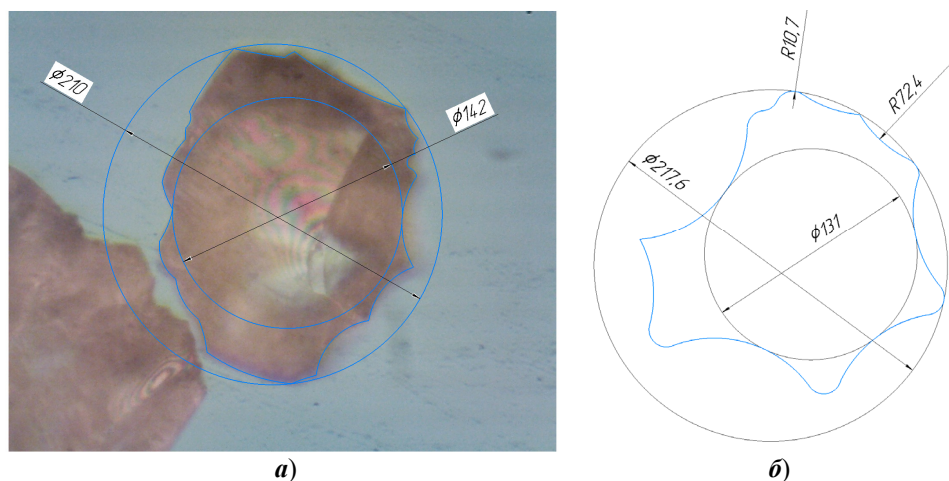


Рис. 3. Зерно гранатового порошка для гидроабразивной обработки: *а* – фотография частицы из массива выборки ($\times 50$); *б* – усредненная модель частицы, разработанная по статистическим данным (средний радиус выпуклых дуг $R_{\text{ср.вып}} = 0,012$ мм ;

средний радиус вогнутых дуг $R_{\text{ср.вог}} = -0,95$ мм; диаметр вписанной окружности $d_1 = 0,173$ мм ; диаметр описанной окружности $d_2 = 0,299$ мм)

Заключение

Методика, изложенная в работе, может послужить основой для введения ряда количественных параметров, характеризующих форму зерна и остроту рельефа, что является новым этапом в научном подходе к изучению дискретных, в частности абразивных, сред. Количественная оценка геометрии частиц абразивных сред позволяет получить исходные данные для моделирования процесса резания свободным абразивом в САЕ-системах, проектирования единичных абразивных частиц, участвующих в процессе абразивного резания, тем самым создавая предпосылки для прогнозирования результатов обработки. Изложенная методика пригодна для оценки частиц дискретных сред различного характера и назначения, в частности, для оценки сред, применяемых в порошковой металлургии. Кроме того, появляется возможность объективного сравнения различных видов и составов абразивных материалов статистическими методами, что существенно расширяет возможности, предоставленные методиками, изложенными в стандартах.

Список литературы

1. Барсуков Г. В., Михеев А. В. Моделирование внедрения твердой частицы в преграду при различных кинематических углах сверхзвукового контактного взаимодействия // Мир Науки. 2014. № 4. С. 43–46.

2. Яшков В. А. Моделирование взаимодействия режущих абразивных зерен с поверхностью детали // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 12. С. 403–407.
3. Понукалин А. В., Зверовщиков А. Е., Зверовщиков Е. А., Миронычев Н. А. Характеристики поверхности абразивного рабочего тела для моделирования объемной центробежно-планетарной обработки в САЕ систем // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управления проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : Приволжский дом знаний, 2011. С. 29–32.
4. Димов Ю. В. Обработка деталей свободным абразивом. Иркутск : Изд-во ИГТУ, 2000. 293 с.
5. Литовка Г. В. Оценка режущей способности абразивных гранул // Инженерный журнал. 2010. № 7. С. 23–28.
6. Крагельский И. В. Трение и износ. 2-е изд. М. : Машиностроение, 1968. 481 с.

References

1. Barsukov G.V., Mikheev A.V. Modeling the penetration of a solid particle into an obstacle at various kinematic angles of supersonic contact interaction. *Mir Nauki = The world of science*. 2014;4:43–46. (In Russ.)
2. Yashkov V.A. Modeling the interaction of cutting abrasive grains with the surface of the part. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2018;12:403–407. (In Russ.)
3. Ponukalin A.V., Zverovshchikov A.E., Zverovshchikov E.A., Mironychev N.A. Characteristics of the surface of an abrasive working fluid for modeling volumetric centrifugal-planetary processing in SAE systems. *Sistemy proektirovaniya, modelirovaniya, podgotovki proizvodstva i upravleniya proektami CAD/CAM/CAE/PDM: sb. st. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Design, modeling, production preparation and project management systems CAD/CAM/CAE/PDM: proceedings of the 5th International scientific and practical conference*. Penza: Privolzhskiy dom znaniy, 2011:29–32. (In Russ.)
4. Dimov Yu.V. *Obrabotka detaley svobodnym abrazivom = Free abrasive machining of parts*. Irkutsk: Izd-vo IG TU, 2000:293. (In Russ.)
5. Litovka G.V. Evaluation of the cutting ability of abrasive granules. *Inzhenernyy zhurnal = Engineering journal*. 2010;7:23–28. (In Russ.)
6. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos = Friction and wear*. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1968:481. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич Зверовщиков
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Aleksandr E. Zverovshchikov
Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of engineering
technologies and equipment, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Геннадий Геннадьевич Лебедев
аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: normatechnology@gmail.com

Gennadiy G. Lebedev
Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Павел Александрович Гурин

кандидат технических наук, доцент
кафедры технологий и оборудования
машиностроения, Пензенский
государственный университет,
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: sbgurin_pavel@list.ru

Pavel A. Gurin

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of engineering technologies and equipment,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 23.11.2020

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 07.12.2020

Принята к публикации / Accepted 20.12.2020