

К ВОПРОСУ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗЕРЕН ШЛИФПОРОШКОВ ПРИРОДНОГО АЛМАЗА

© 2020 М.Н. Сафонова, А.А. Федотов, Л.М. Варламова

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, г. Якутск, Россия

Статья поступила в редакцию 02.12.2020

Приведены результаты исследований по установлению наиболее адекватной 3D модели зерна шлифпорошков природного алмаза. Критерием адекватности принята максимальная точность совпадения экспериментальных и расчетных значений контрольных характеристик при различных 3D моделях зерна. Проведенный количественный анализ показал, что наиболее близким аналогом пространственно-геометрической формой зерна шлифпорошков природного алмаза является экстраполяционно-аффинная 3D модель.

Ключевые слова: экстраполяционно-аффинная 3D модель; порошки природных алмазов, геометрическая форма

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-31-35

ВВЕДЕНИЕ

В производстве абразивного инструмента для резания, шлифования, полирования и точной обработки изделий из металлов, сплавов и минералов используются порошки природных и чаще синтетических алмазов. Поразительным является правильность кристаллической формы алмазов, выращенных синтетически. Среди природных алмазов правильные кристаллы с совершенно четко очерченными гранями встречаются редко; чаще встречается округлые кристаллы или кристаллы неправильной формы.

Изучение морфометрических характеристик, прочности, удельной поверхности, содержания зерен в режущем слое и других эксплуатационных характеристик алмазных порошков с привлечением возможностей компьютерных технологий и новейших автоматизированных средств испытаний является актуальной научно-прикладной задачей современного материаловедения сверхтвердых дисперсных материалов [1-6].

Анализ научных публикаций показывает, что при разработке методов опосредованной диагностики характеристик порошков сверхтвердых материалов (СТМ) исходят из 3D модели зерна в форме классических пространственно-объемных тел правильной формы: шара, куба, трехосного эллипсоида, параллелепипеда. В работе [6] предложена новая экстраполяционно-аффинная 3D модель зерна порошков СТМ. Проводившийся количественный сравнитель-

ный анализ этой 3D модели применительно к порошкам синтетических алмазов на примере количества их зерен в одном карате порошка [6] показал, что она обеспечивает более точные по сравнению с другими известными расчетными методами результаты.

Поэтому **целью работы** является применение экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна применительно к порошкам природных алмазов и оценка ее адекватности.

При этом ставится задача провести сопоставительный анализ и других, часто используемых 3D моделей в форме шара, куба, трехосного эллипсоида, параллелепипеда. Критерием адекватности при решении таких задач будет служить степень совпадения расчетных значений некоторых контрольных эксплуатационных характеристик, полученных с использованием той или иной 3D модели зерна и фактических (экспериментальных) их значений. В качестве таких контрольных эксплуатационных характеристик будем использовать количество зерен в одном карате порошка, его внешнюю удельную поверхность и показатели ситового зернового состава.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве абразивного материала использовались шлифпорошки природного (A5K50 250/200, A8K50 315/250, A3K50 400/315) и синтетического (AC50 250/200, AC50 315/250, AC50 400/315) алмаза. На рис. 1 приведены РЭМ-фотографии зерен исследованных алмазных шлифпорошков.

Видно, что зерна природных алмазов являются совокупностью осколочных частиц неправильной формы, произвольное сечение которых в подавляющем большинстве случаев можно

Сафонова Мария Николаевна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Прикладная математика». E-mail: marisafon_2006@mail.ru

Федотов Андрей Андреевич, старший преподаватель.

Варламова Лира Мефодьевна, старший преподаватель. E-mail: varlamovalm@mail.ru

считать четырех- или пятиугольниками, как и в других несферических порошках.

При визуальном рассмотрении зерен шлифпорошков алмаза установлено, что зерна шлифпорошков из синтетических алмазов имеют округлую форму, а зерна из природных алмазов имеют, в основном пластинчатую и игольчатую формы, встречаются кристаллы с четкой гранкой и с острыми ребрами (рис. 1).

Частицы порошков природных алмазов, являясь частицами осколочного типа, имеют сложную неправильную пространственно-объемную форму. Для более точного описания геометрии таких зерен представляется целесообразным применение экстраполяционно-аффинной 3D модели, которая, как отмечается в [6], учитывает форму фактической проекции зерен.

ЭКСТРАПОЛЯЦИОННО-АФФИНАЯ 3D МОДЕЛЬ ЗЕРНА ПОРОШКОВ СТМ

Эта модель кроме трех размерных параметров зерна (длина и ширина проекции, высота)

содержит еще две геометрические характеристики (площадь и периметр проекции), а также одну морфологическую характеристику – фактическую форму проекции. Такое увеличение количества унаследованных параметров зерна повышает адекватность предложенной модели. Разработан алгоритм построения новой модели, а также методика численного расчета площади поверхности и объема такого 3D аналога. Предложенная модель (рис.2, а) базируется на математическом аппарате отображения аффинного пространства [7].

Как отображающие операторы используются плоская гомотетия и параллельный перенос. Коэффициент гомотетии находится из условия, что траекторией такого сложного результирующего движения (параллельный перенос + гомотетия) каждой точки прообраза есть эллипс (рис.2 б). Прообразом отображения выступает оцифрованный контур изображения зерна, наблюдаемый в поле зрения микроскопа. Однако процедура оцифровки контура не является обязательной элементом. Проведенный анали-

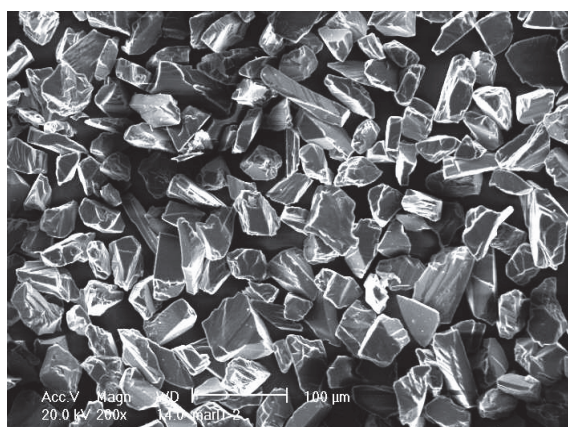
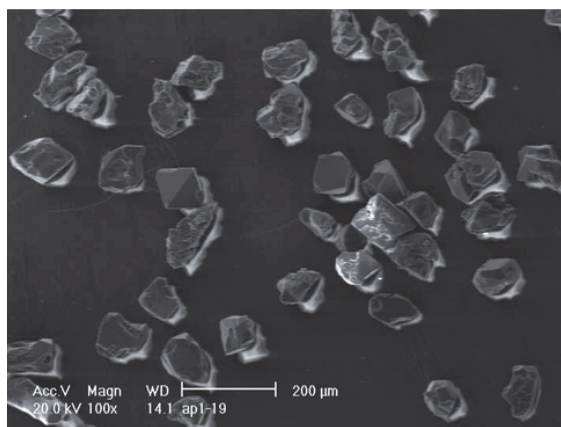


Рис. 1. Зерна шлифпорошков из синтетических (а) и природных алмазов (б)

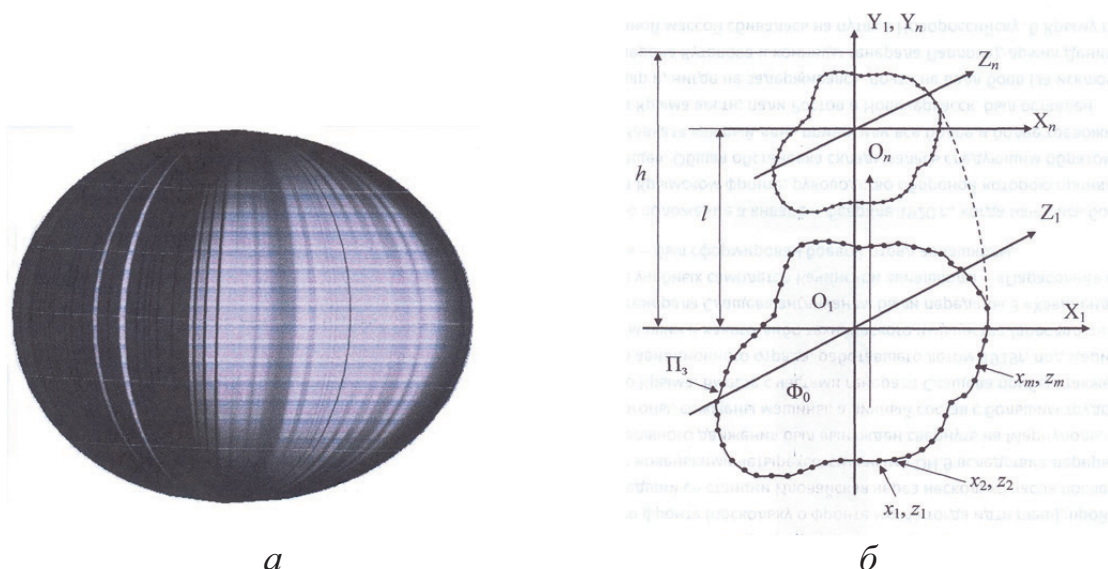


Рис. 2. Экстраполяционно-аффинная 3D-модель зерна порошков СТМ (а) и схема его построения (б)

тический анализ показал, что с учетом метрических свойств гомотетии как отображающего оператора достаточно информации по площади и периметру проекции зерна, максимальному и минимальному ее диаметрам и высоте зерен. Именно все эти характеристики и входят в число исходных данных, необходимых для построения и обсчета предложенной новой 3D модели зерна порошков СТМ. Оцифровка же контура проекции необходима только для графической ее иллюстрации.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Практическая диагностика морфометрических характеристик порошков проводилась на приборе DiaInspect.OSM фирмы Vollstaedt Diamant GmbH [8]. Диагностировались следующие морфометрические характеристики: площадь проекции зерна (A , мкм²), периметры истинного (фактического, p , мкм) и выпуклого (p_{conv} , мкм) его контуров, максимальный (F_{max} , мкм) и минимальный (F_{min} , мкм) диаметры Feret, средний (d_m , мкм) и эквивалентный (d_3 , мкм) диаметры зерна, форм-фактор фактического изображения проекции зерна (C_r), эллиптичность (симметричность, E), Feret-удлинение (F_{el}), шероховатость (Rg) зерен. Дополнительно на основании данных DiaInspect-диагностики проводилось вычисление удельного периметра

проекции зерен ($P_{уд}$). Интерпретацию геометрической сущности перечисленных морфометрических характеристик и более полное их описание можно найти в работе [9]. Здесь же кратко отметим, что эти характеристики описывают величину зерен (F_{max} , F_{min} , d_c , d_3), их форму (C_r , F_e) и топографию поверхности ($P_{уд}$, Rg). Данные диагностики представлены в табл. 1. Для сравнения в табл. 1 приведены также значения морфометрических характеристик аналогичных по марке и зернистости шлифпорошков синтетического алмаза. Не акцентируя особого внимания отметим, что сравниваемые шлифпорошки природного и синтетического алмаза по показателям многих морфометрических характеристик близки между собой. В тоже время по некоторым характеристикам между ними наблюдается ощутимое различие. В первую очередь это касается характеристик формы и симметрии зерен. Это говорит о том, что не правомерно априори полагать, что наиболее адекватная для порошков СА экстраполяционно-аффинная 3D-модель зерна будет таковой и для порошков природного алмаза (ПА). Данное обстоятельство является еще одним подтверждением необходимости и целесообразности исследования вопроса о выборе наиболее адекватной 3D-модели зерна порошков ПА на количественном уровне.

На этом же приборе, но в ручном режиме и на укороченной пробе зерен (20–30 шт.), измерялась и высота зерен. Методика такого

Таблица 1. Средние значения морфометрических характеристик контрольных шлифпорошков природного (A5K50 250/200, A8K50 315/250, A3K50 400/315) и синтетического (AC50 250/200, AC50 315/250, AC50 400/315) алмаза

Название характеристик	A5K50 250/200	A8K50 315/250	A3K50 400/315	AC 50 250/200	AC 50 315/250	AC50 400/315
F_{max} , МКМ	354,2	431,7	597,4	318,0906	395,4689	493,7
F_{min} , МКМ	266,2	355,2	431,4	273,4261	341,4330	429,6
C_r	1,3268	1,3495	1,2624	1,2667	1,2678	1,2790
E	1,3013	1,3117	1,3782	1,2294	1,2203	1,2061
F_{el}	1,3351	1,2207	1,3904	1,1664	1,1613	1,1541
Rg	1,0658	1,0762	1,0596	1,0654	1,0666	1,0700
d_m , МКМ	310,2	393,5	514,4	295,6	368,5	461,7
d_3 , МКМ	290,7	353,4	491,5	272,3	339,5	424,3
A , МКМ ²	67103	98910	192192	58607	91359	142697
p_r , МКМ	1052,3	1288,5	1734,6	962,5	1200,0	1506,3
p_{conv} , МКМ	986,5	1197,1	1636,7	903,0	1124,9	1407,2
$P_{уд}$, 1/М	0,0160	0,0133	0,0093	0,0166	0,0135	0,0108
k_h	0,816	0,811	0,746	0,853	0,827	0,796

измерения состояла в следующем. Полагали, что высота зерен ($H=2h$) связана с минимальным диаметром Feret (F_{min}) зависимостью $H = k_h F_{min}$, где k_h – коэффициент пропорциональности. Для определения его значений на приборе DiaInspect.OSM в мультифокусном режиме работы измеряли H и F_{min} 20÷30 зерен. Находились средние значения указанных размерных параметров, H_c и F_{minc} соответственно, и их отношение $k_h = H_c/F_{minc}$. Найденное таким методом k_h использовалось для определения высоты каждого из продиагностированной на приборе DiaInspect.OSM пробы зерен, необходимой для вычисления их объема и площади поверхности. Высота находилась умножением F_{min} анализируемого зерна на коэффициент пропорциональности k_h . Полученные значения коэффициента k_h для контрольных шлифпорошков приведены в табл. 1.

Для экстраполяционно-аффинной 3D модели объем зерен вычислялся по методике, описанной в [10]. Для остальных рассматриваемых здесь 3D моделей зерна объем вычислялся по известным формулам как объем трехосного эллипсоида, шара, куба и параллелепипеда соответственно. Полученные расчетные значения показателей ситового зернового состава исследуемых шлифпорошков при различных 3D моделях зерна представлены в табл. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ показывает, что наименьшая относительная погрешность имеет место в случае экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна. Для 3D модели в форме трехосного эллипсоида она несколько больше, но в приемлемом диапазоне. Что касается остальных 3D моделей, то их применение почти во всех случаях приводит к ошибочной идентификации основной фракции порошка. Таким образом, можем констатировать, что и в случае этой контрольной характеристики предпочтение следует отдать экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна. Наиболее близкая к экстраполяционно-аффинной с точки зрения адекватности является 3D модель в форме трехосного эллипсоида. Третьей в этом ряду идет 3D модель в форме параллелепипеда. Что касается 3D моделей в форме шара и куба, то они дают очень большую погрешность, что может привести к неадекватным заключениям при решении указанных выше задач.

ВЫВОДЫ

Режущая способность шлифовальных инструментов, эффективность их применения, а также качество обработанных поверхностей во многом зависят от линейных размеров зерен. При моделировании процессов шлифова-

Таблица 2. Расчетные показатели ситового зернового состава контрольных шлифпорошков природного алмаза при различных 3D моделях зерна (1 – экстраполяционно-аффинная, 2– трехосный эллипсоид, 3 – шар, 4 – куб, 5 – параллелепипед)

Марка и зернистость (мкм) шлифпорошка	3D модель зерна	Относительное содержание зерен по фракциям, %			
		мелкая	основная	крупная	предельная
A5K50 250/200	1	1,21	83,25	4,50	0,00
	2	1,26	85,10	4,61	0,00
	3	0,00	3,33	69,81	27,09
	4	0,00	3,33	69,81	27,09
	5	0,25	50,46	45,23	1,10
A8K50 312/250	1	0,75	84,12	8,59	0,00
	2	0,78	86,74	0,00	0,00
	3	0,00	3,84	85,67	10,61
	4	0,00	3,84	85,67	10,11
	5	0,50	1,13	66,27	3,25
A3K50 400/315	1	1,20	85,54	2,59	0,00
	2	1,23	87,01	2,60	0,00
	3	0,00	1,09	42,31	56,47
	4	0,00	1,09	42,31	58,47
	5	0,36	52,47	45,64	0,00

ния важным является использование формы абразивных зерен в качестве базовой модели. На основании проведенных исследований при решении задач диагностики характеристик порошков ПА компьютерно-аналитическими методами следует использовать экстраполяционно-аффинную 3D модель зерна. Основанный на такой 3D модели зерна количественный анализ будет способствовать более глубокому пониманию процессов обработки, обоснованному поиску состава композиционных инструментальных материалов, прогнозированию их свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин Ю.И., Уман С.М., Коберниченко Л.В. и др. Порошки и пасты из синтетических алмазов – Киев: Наук. думка, 1992. 284 с.
2. Петасюк Г.А. Обобщенная математическая модель процедуры ситовой классификации порошков сверхтвердых материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2007. Вып. 10. С. 212–216.
3. Петасюк Г.А. Дискретно-геометрический метод определения внешней удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 59–64.
4. Петасюк Г.А. Экстраполяционно-геометрический метод определения насыпной плотности порошков сверхтвердых материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2010. Вып. 13. С. 375–380.
5. Сафонова М. Н., Сыромятникова А. С., Шиц Е. Ю. Расчетно-экспериментальный метод определения количества активных зерен в абразивном композиционном материале // Трение и износ. 2007. Т. 28. № 5. С. 471–476.
6. Петасюк Г.А., Сирота Ю.В. Экстраполяционно-аффинная 3D модель зерна порошков сверхтвердых материалов и ее приложения // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. Вып. 14. С. 292–295.
7. Перепелица Б.А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. Харьков: Высшая школа, 1981. 107 с.
8. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Industrial diamond review. 2006. № 1. P. 42–47.
9. К вопросу однородности алмазных микропорошков по морфологическим характеристикам / Г.П. Богатырева, Г.А. Петасюк, Г.А. Базалий, В.С. Шахраева // Сверхтвердые материалы. 2009. № 2. С. 71–81.
10. Сафонова М.Н., Петасюк Г.А., Сыромятникова А.С. Компьютерно-аналитические методы диагностики эксплуатационных характеристик алмазных порошков / Отв. Ред. М.П. Лебедев. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2013. 222 с.

TO THE QUESTION OF 3D MODELING OF GRAINS OF NATURAL DIAMOND POWDERS

© 2020 M.N. Safonova, A.A. Fedotov, L.M. Varlamova

North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

The results of research to establish the most appropriate 3D model of grinding powder's grains of natural diamond are adjusted. Criterion of adequacy is adopted a maximum precision match experimental and calculated values of control characteristics in various 3D models of grain. The quantitative analysis revealed that the closest analogue of the geometric form of spatially-grain grinding powders natural diamond is extrapolation-affine 3D model.

Key words: extrapolation-affine 3D model, natural diamond powders, geometric form

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-31-35

*Maria Safonova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics.
E-mail: marisafon_2006@mail.ru
Andrey Fedotov, Senior Lecturer.
Lira Varlamova, Senior Lecturer.
E-mail: varlamovalm@mail.ru*