

УДК 621.921.34–492.2:539.215

Г. А. Петасюк, канд. техн. наук

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

### **ЭКСТРАПОЛЯЦИОННО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОРОШКОВ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*New method of determination of packed density of superhard material powders has been presented. The method is based on 3D-simulation methodology with applying of affinity space mapping mathematics. The results of this method approbation to standard powders of synthetic diamond and cubic boron nitride are given.*

Диагностика характеристик порошков сверхтвердых материалов (СТМ) традиционными методами занимает много времени, требует предварительной тщательной подготовки пробы порошка. Необходимое количество порошка в пробах для испытаний чаще всего исчисляется не зернами или несколькими их каратами, а граммами. В этой связи разработка экономичных, малозатратных, экспрессных компьютерно-аналитических методов диагностики характеристик порошков СТМ и сравнительной оценки их качества является актуальной научно-прикладной задачей материаловедения сверхтвердых дисперсных материалов. Особенно такие методы необходимы и эффективны при разработке технологий изготовления абразивных порошков с определенными эксплуатационными характеристиками. Особенность этого процесса заключается в многократном сравнительном анализе различных вариантов сочетания технологических параметров (например, режимов работы используемого оборудования, схем и способов предварительной обработки порошков), влияющих на эксплуатационные характеристики изготавливаемых порошков. Значения этих характеристик и являются критериями оценки того или иного варианта разрабатываемых технологии. Компьютерно-аналитические методы диагностики эффективно также применять при изготовлении абразивного инструмента, когда заказчик располагает альтернативой выбора порошка, а значения основных эксплуатационных характеристик порошков-претендентов неизвестны. В подобных ситуациях не так важны абсолютные значения интересующих характеристик, как их динамика изменения при переходе от одного исследуемого образца к другому. Поскольку при этом образцы диагностируют одним методом, то нивелируется погрешность применяемого метода расчета (диагностики) как фактора, который при однократном применении метода является доминирующим. В то же время при использовании компьютерно-аналитических методов диагностики значительно сокращается продолжительность выбора наиболее подходящего образца из совокупности порошков-претендентов за счет существенного сокращения продолжительности диагностики. При необходимости значения интересующих характеристик выбранного таким способом идеального порошка можно уточнить посредством разовых натуральных испытаний. Этот пример является частным случаем более общей задачи сравнительной оценки качества абразивных порошков различных производителей или идентифицированных по различным стандартам.

В Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ) разработан оригинальный экстраполяционно-геометрический метод расчетного определения насыпной плотности порошков СТМ. Основная научная новизна этого метода касается пространственно-геометрической модели зерна, алгоритма ее построения, совокупности и состава используемых в качестве исходных данных характеристик порошка. Более конкретно новизна метода состоит в следующем:

разработанная пространственно-геометрическая модель зерна наиболее приближена к фактической его форме по сравнению с известными модельными аналогами и основана на таких характеристиках зерна, как максимальный и минимальный диаметры его проекции,

площадь, периметр и форма проекции. При использовании этой модели существенно повышается точность расчета насыпной плотности;

разработан оригинальный компьютерный алгоритм построения предложенной 3D модели зерна. Оригинальность этого алгоритма состоит в том, что в качестве инструмента построения предложен математический аппарат отображения аффинного пространства. Отметим, что диагностика характеристик порошков СТМ – новая сфера прикладного использования отображения аффинного пространства, а основной является исследование кинематики формообразования при алмазно-абразивной обработке;

применена новая, отличная от классической, постановка решаемой задачи.

Классическая постановка подобных задач основана на упрощающих предпосылках, которые рассмотрим далее. По содержанию эти предпосылки слишком идеализированы, что искажает достоверность получаемых результатов. В предложенном экстраполяционно-геометрическом методе предпосылок значительно меньше. Кроме того, они более адекватны относительно реальной схемы определения насыпной плотности.

Основным атрибутом традиционной схемы испытаний порошка [1] на предмет определения насыпной плотности ( $\rho_n$ ) является мерный стакан. Насыпная плотность порошка при этом определяется по формуле:

$$\rho_n = \frac{m}{W_\Sigma},$$

где  $m$  – масса порошка в мерном стакане;  $W_\Sigma$  – объем мерного стакана (на практике используют мерный стакан объемом 10 см<sup>3</sup>). Такая схема испытаний довольно проста, однако относительно продолжительна и требует наличия не менее 20 г порошка.

Предлагаемый метод расчетного определения насыпной плотности основан на использовании данных диагностики размерных и геометрических характеристик порошка (например, на приборе DialInspect.OSM [2]) и не имеет лимитирующих факторов. В этой связи отметим, что задачу моделирования насыпной плотности дисперсных материалов в порошковой металлургии и процессах химической технологии [3; 4] обычно решают в известной классической постановке, основанной на укладке пространственно объемных тел правильной формы, как правило, шаров. При этом исходят из предпосылки об однородности укладываемых тел по форме и размеру, а также регулярности их укладки. Применительно к порошкам СТМ эти предпосылки, как отмечалось, далеки от действительности со всеми вытекающими отсюда последствиями относительно адекватности получаемых результатов. В ИСМ разработан более совершенный экстраполяционно-геометрический безукладочный метод расчетного определения насыпной плотности порошков СТМ. Этот метод основан на введенном понятии охватывающей оболочки и не предусматривает весового анализа мерного стакана до и после засыпания в него порошка и фиксации объема заполненного стакана. При этом требуемое количество порошка исчисляется не в граммах, а в штуках (1500-2000 зерен вместо 20 г). Основная идея метода состоит в расчете суммарного объема зерен в испытываемой пробе  $V_3$  и объема этих зерен в мерном стакане  $W$ . Если эти объемы известны, то с учетом того, что  $m = V_3 \rho_T$  ( $\rho_T$  – плотность материала порошка) насыпная плотность определяется по формуле:

$$\rho_n = \frac{V_3}{W} \rho_T$$

В таком случае определение насыпной плотности сводится к расчету объемов  $V_3$  и  $W$ . Объем  $V_3$  можно определить по алгоритму расчетного определения внешней удельной поверхности [5]. При расчете объема  $W$  будем исходить из того, что он состоит из суммарного объема зерен в пробе  $V_3$  и объема межзеренного пространства (пустот)  $V_{п.}$ , т. е.  $W = V_3 + V_{п.}$ . Объем  $V_{п.}$ , который дополняет  $V_3$  к  $W$ , разобьем (разнесем) по всем зернам пробы пропорционально их объему. При этом предположим, что каждое зерно пробы охвачено оболочкой объемом  $w$ . Разность объемов охватывающей оболочки и содержащегося в ней зерна равна доле объема  $V_{п.}$ , приходящегося на это зерно. При таком подходе количество охватывающих

оболочек равно количеству зерен в пробе. Сумму объемов отдельных охватывающих оболочек ( $W_0$ ) рассчитываем по формуле

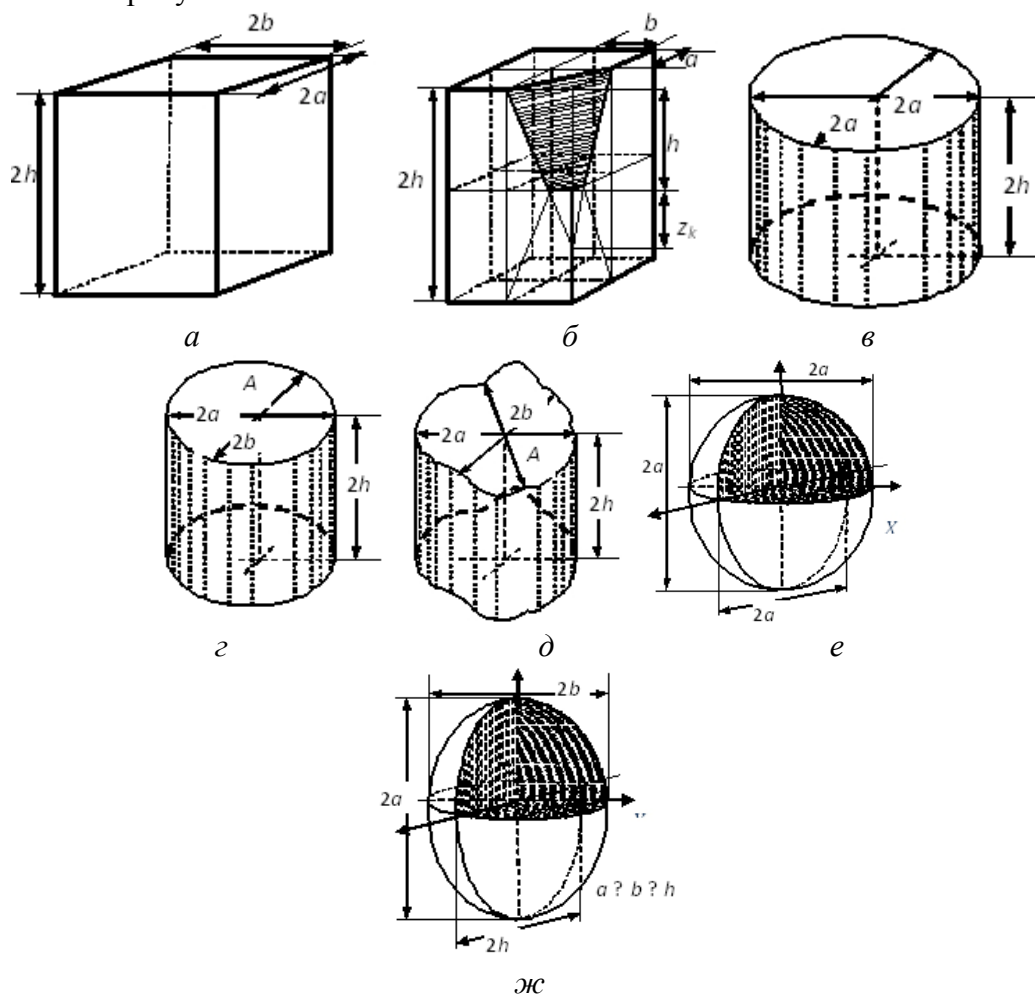
$$W_0 = \sum_{n=1}^N w_n,$$

принимая затем  $W = W_0$ . Здесь  $N$  – количество зерен в пробе,  $w_n$  – объем охватывающей оболочки зерна с номером  $n$ .

С учетом этого формула для определения насыпной плотности приобретает вид

$$\rho_n = \frac{V_3}{W_0} \rho_T$$

В качестве охватывающих оболочек будем рассматривать либо пространственно-геометрические тела правильной формы, либо цилиндрические тела, основания которых повторяют форму и площадь проекции зерна. Используемый здесь арсенал охватывающих оболочек показан на рисунке.



Принятые пространственно-геометрические модели охватывающих оболочек: (а – параллелепипед; б – усеченный параллелепипед (показан элемент симметрии); в – прямой круговой цилиндр; г – прямой эллиптический цилиндр; д – прямой некруговой цилиндр; е – сфера (шар); ж – трехосный эллипсоид и эллипсоид вращения).

Размеры охватывающих оболочек будем отождествлять с известными размерными и геометрическими характеристиками зерен. Например, длину ( $2a$ ), ширину ( $2b$ ) и высоту ( $2h$ ) параллелепипеда будем отождествлять с максимальным  $d_{max}$  и минимальным  $d_{min}$  диаметра-

ми Feret, высоту – с высотой  $H$  зерна. В табл. 1 приведены 27 вариантов рассматриваемых охватывающих оболочек и указаны их геометрические параметры.

Таблица 1. Параметры принятых моделей охватывающих оболочек

№ п/п	Охватывающая оболочка	Параметры
1	Параллелепипед (рис. <i>a</i> )	$2a$ – длина основания, $2b$ – ширина основания, $2h$ – высота
2–11	Усеченный параллелепипед (рис. <i>б</i> )	$z_k$ – высота срезанной части отсекаемых от параллелепипеда пирамид
12	Куб (рис. <i>a</i> )	$2a$ – длина ребра
13–15	Прямой круговой цилиндр (рис. 1, <i>в</i> )	$2a$ – диаметр основания, $2h$ – высота
16	Прямой эллиптический цилиндр (рис. <i>з</i> )	$a$ – большая полуось эллипса, $b$ – малая полуось эллипса, $2h$ – высота
17–22	Прямой некруговой цилиндр (рис. <i>д</i> )	Форма основания повторяет форму проекции зерна, $2h$ – высота
23–25	Сфера (шар) (рис. <i>e</i> )	$2a$ – диаметр
26	Трехосный эллипсоид (рис. <i>ж</i> )	$a, b, h$ – полуоси эллипса, $a \geq b \geq h$
27	Эллипсоид вращения (рис. <i>ж</i> )	$a, b, h$ – полуоси эллипса, $a \geq b = h$

Идентификация этих параметров и соответствующие формулы для определения объема охватывающих оболочек приведены в табл. 2.

Таблица 2. Идентификация параметров принятых геометрических аналогов охватывающих оболочек и формулы для расчета их объема

№ п/п	Идентификация параметров аналогов охватывающих оболочек	Формула для расчета объема
1	$2a = D_{max}, 2b = D_{min}, 2h = H$	$v_o = 8abh$
2–11	$2a = D_{max}, 2b = D_{min}, 2h = H;$ $z_k = 0,00 - 0,69$	$v_o = 4abh(1 + Z_k)/3$ $Z_k = z_k [1 - (z_k / (1 + z_k))]^2$
12	$2a = D_{min}$	$v_o = 8a^3$
13	$2a = D_{max}, 2h = H$	$v_o = 2\pi a^2 h$
14	$2a = D_{min}, 2h = H$	
15	$2a = (D_{max} + D_{min})/2, 2h = H$	
16	$2a = D_{max}, 2b = D_{min}, 2h = H$	$v_o = 2\pi abh$
17	$S_0 = A, 2h = H$	$v_o = 2S_0 h$
18	$S_0 = A, 2h = D_{max}$	
19	$S_0 = A, 2h = D_{min}$	
20	$S_0 = A, 2h = (D_{max} + D_{min})/2$	
21	$S_0 = A, 2h = (D_{max} + D_{min})/4$	
22	$S_0 = A, 2h = \sqrt{D_{max} D_{min}}$	
23	$2a = D_{max}$	$v_o = 4\pi a^3 / 3$
24	$2a = D_{min}$	
25	$2a = (D_{max} + D_{min})/2$	
26	$2a = D_{max}, 2b = D_{min}, 2h = H$	$v_o = 4\pi abh / 3$
27	$2a = D_{max}, 2b = D_{min}, 2h = D_{min}$	$v_o = 4\pi ab^2 / 3$

Наиболее подходящую охватывающую оболочку определяют путем тестирования разработанного метода на порошках с известной насыпной плотностью при различных вариантах охватывающих оболочек. Оптимальной принимают оболочку, при которой расчетное значение насыпной плотности наиболее близко к фактическому ее значению.

В результате исследований установлено, что в случае определения насыпной плотности шлифпорошков синтетического алмаза при свободном засыпании оптимальной в оговоренном выше смысле охватывающей оболочкой будет некруговой цилиндр с высотой  $2h = D_{min}$ , площадь основания которого равна площади проекции зерна и повторяет ее форму (вариант № 19 по табл. 2).

Для микропорошков синтетического алмаза наиболее адекватной охватывающей оболочкой будет некруговой цилиндр высотой  $2h = (D_{max} + D_{min})/4$  (вариант № 21). В первом случае средняя относительная погрешность расчета составляет 2,24 % при вариационном размахе ее значений 0,086 % – 5,45 %, во втором – 1,89 % при вариационном размахе значений 1,0 % – 6,0 %.

При засыпании с утряской наибольшее совпадение расчетного и фактического значений насыпной плотности как для шлиф-, так и для микропорошков синтетического алмаза присуще эллипсоиду вращения. Средняя погрешность расчета составляет 9,56 % при вариационном размахе значений 0,33 % – 21,56 %.

Аналогично можно установить наиболее оптимальную из совокупности предложенных вариантов охватывающую оболочку и для порошков других видов СТМ. При наличии подобной информацией можно без натурных испытаний с помощью изложенного метода расчетным путем определять насыпную плотность порошков синтетического алмаза и других СТМ.

### **Выводы**

1. Разработан новый экстраполяционно-геометрический метод косвенного определения насыпной плотности порошков СТМ.

2. Предлагаемый метод основан на введенном понятии охватывающей оболочки. Проведен анализ большого количества форм таких оболочек в целях установления наиболее адекватного варианта для порошков синтетического алмаза.

3. На основании проведенного исследования для расчета насыпной плотности шлифпорошков синтетического алмаза при свободном засыпании можно рекомендовать в качестве охватывающей оболочки использовать некруговой цилиндр высотой  $D_{min}$  и площадью основания, равной площади проекции зерна и повторяющей ее форму. Для микропорошков синтетического алмаза в качестве охватывающей оболочки следует использовать аналогичный по виду цилиндр, но с высотой  $0,25(D_{max} + D_{min})$ . При засыпании с утряской в качестве охватывающей оболочки и в первом, и во втором случаях следует брать эллипсоид вращения.

4. Результаты апробации разработанного метода свидетельствуют о хорошей сходимости расчетных и экспериментальных данных.

### **Литература**

1. Порошки и пасты из синтетических алмазов / Ю. И. Никитин, С. М. Уман, Л. В. Коберниченко и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 284 с.
2. 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.
3. Циборовский Я. Основы процессов химической технологии: Пер. с польск. / Под ред. П. Г. Романкова. – Л.: Химия, 1967. – 720 с.
4. Аксенов Г. И. Основы порошковой металлургии. – Куйбышев: Кн. изд-во, 1962. – 200 с.
5. Петасюк Г. А., Богатырева Г. П. Экстраполяционно-аналитический метод определения удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // *Сверхтвердые материалы*. – 2007. – № 6. – С. 65–76.

*Поступила 23.04.10*