

темнеет (оптическое поглощение на длине волны 532 нм возрастает в 4 раза), а скорость осаждения увеличивается с 2,5 до 4,1 мкм/час,

2. Достижение более высоких скоростей роста алмаза (до 5,5 мкм/час) возможно за счет повышения концентрации метана в газе до 6-10% при использовании тройных смесей  $H_2-O_2-CH_4$ .

3. Эффективным способом предотвращения образования графитовой фазы в объеме алмаза и включений неалмазных фаз в виде аморфного углерода и графита является травление кислородом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 10-08-90438-Укр\_а, № 10-08-01256-а и Национальной академии наук Украины, проект № 29-08-11.

*У даній роботі представлені результати по емісійно-спектроскопічним дослідженням СВЧ плазми в процесі газозафазового вирощування CVD алмазу при осадженні полікристалічних алмазних пластин на кремнієвих підкладках, а також результати з дослідження морфологічних особливостей одержуваних з них армуючих вставок ГАКТМ.*

**Ключові слова:** CVD алмаз, газозафазовне вирощування, ростова поверхня.

*This paper presents the results of the emission-spectroscopic studies of microwave plasma CVD process of diamond growth gazofazovogo the deposition of polycrystalline diamond plates on silicon substrates, as well as to study the morphological features of diamond inserts for a hybrid composite material*

**Key words:** CVD diamond, growth from the gas phase, the growth surface.

#### Литература

1. Новый гибридный ультратвердый материал / А. А. Шульженко Е. Е. Ашкинази, А. Н. Соколов и др. // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 5. – С. 3–14.
2. Роль пластической деформации в процессах спекания алмазного гибридного материала на структуру и твердость CVD-алмаза / А. А. Шульженко, Е. Е. Ашкинази, А. Н. Соколов и др. // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр.– К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – Сер. Материаловедение. – С. 77–89.
3. High crystalline quality single crystal chemical vapour deposition diamond / P. M. Martineau<sup>1</sup>, M. P. Gaukroger<sup>1</sup>, K. B. Guy et al. // J. Phys.: Condens. Matter. – 2009. – 21, N 36. – doi: 10.1088/0953-8984/21/36/364223 .
4. Автоматизированный СВЧ-плазмохимический реактор для выращивания микро- и нанокристаллических алмазных пленок и пластин ARDIS 100 // Интернет ресурс – <http://www.cvd-diamond.ru/>.

Поступила 14.07.11

УДК 621.921.34–492.2:539.215

Г. А. Петасюк, Ю. В. Сирота, кандидаты технических наук

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

#### ЭКСТРАПОЛЯЦИОННО-АФФИННАЯ 3D МОДЕЛЬ ЗЕРНА ПОРОШКОВ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

*Предложена новая 3D модель зерна порошков сверхтвердых материалов. Приведены примеры и результаты ее применения к решению конкретных задач диагностики характеристик порошков синтетического алмаза.*

**Ключевые слова:** порошки сверхтвердых материалов, 3D модель зерна, диагностика характеристик.

Пространственно-геометрическая (3D) модель зерна порошков сверхтвердых материалов (СТМ) является одним из основных методических элементов в задачах расчетного определения

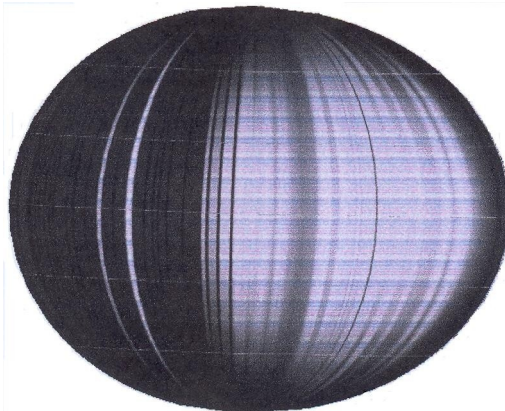
значений (диагностики) их характеристик и теоретических исследованиях процессов алмазно-абразивной обработки. В настоящей работе рассмотрим первую из двух прикладных сфер исследования порошков СТМ – диагностику их характеристик. При решении прикладных задач в качестве 3D модели зерна порошков СТМ чаще всего применяют куб, сферу или эллипсоид [1–3]. Из этих трех 3D моделей зерна передовой еще с начала 70-х годов прошлого века является эллипсоид [1; 2]. Позже этот вывод был подтвержден также на уровне экспериментально-аналитических исследований [4] и его придерживались вплоть до настоящего времени. Однако на практике в расчетных методах диагностики некоторых характеристик порошков СТМ чаще других применяли 3D модель зерна в форме сферы. Прежде всего это касается внешней удельной поверхности [5]. Даже в некоторых современных приборах (например, гранулометре LMS-30 (Япония) [6]) для диагностики этой характеристики абразивных порошков используют именно эту 3D модель абразивного порошка для расчетного определения внешней удельной поверхности. Отметим, что в теоретических исследованиях алмазно-абразивной обработки используют также другие 3D модели зерен: усеченный конус, усеченную пирамиду и др. [4]. Однако для диагностики характеристик порошков подобные модели непригодны.

Еще одним примером использования 3D модели зерна в диагностике характеристик порошков СТМ является расчетное определение количества зерен порошка СТМ, в частности порошков СА, в одном его карате. Как отмечается в [2], использование этих известных моделей при расчете количества зерен в одном карате порошков СА приводит к ошибкам, которые измеряются десятками процентов. Даже если исходить из эллипсоида как наиболее близкого аналога зерна, все равно получаем недопустимо большую ошибку расчетного определения количества зерен в одном карате. Так, согласно [2] для порошка АСО (в соответствии с стандартом [7] – АС2) зернистостью 160/125 со средними размерами зерна 242, 178 и 112 мкм ошибка расчетного определения количества зерен в одном карате составляет 38%. Это не позволяет использовать полученные данные ни для теоретических исследований, ни для практических расчетов. В этой связи разработка новой 3D модели зерна в направлении увеличения совокупности параметров (факторов), унаследованных от реального зерна, является важной научно-прикладной задачей сверхтвердых дисперсных материалов.

**Новая информационно расширенная 3D модель зерна порошков СТМ.** Любая 3D модель зерна порошков СТМ унаследует от реального зерна некоторые геометрические факторы. Например, для куба это один фактор – его ребро. При построении такой 3D модели зерна и различных вычислительных действиях над ней (прежде всего определении объема, площади поверхности) оперируют длиной ребра. Для сферы унаследованным фактором является средний или эквивалентный диаметр зерен. В отличие от ребра куба, которое является реально существующим фактором, последние два фактора можно назвать псевдореальными. Такое название отражает тот факт, что у реальной сферы нет ни среднего, ни эквивалентного диаметра, а просто диаметр. Средний же и эквивалентный диаметры – абстрактные понятия, которые определяют соответственно как среднее арифметическое длины и ширины проекции зерна и как диаметр круга, площадь которого равна площади проекции зерна. Таким образом, количество унаследованных факторов в первом случае равняется двум, во втором – одному. В случае трехосного эллипсоида количество унаследованных факторов составляет три: длина, ширина проекции зерна и его высота. Эти три фактора отождествляются соответственно с максимальной, средней и минимальной осями эллипсоида. Вполне очевидно, что чем большим количеством унаследованных факторов обладает модель, тем она более адекватна. И это может служить критерием сравнительной оценки адекватности различных 3D моделей.

Нами предложена [8] новая 3D модель зерна порошков СТМ в форме эллипсоидовидного тела (см. рисунок), которая содержит пять унаследованных факторов: площадь, периметр, максимальный ( $Feret_{max}$ ), минимальный ( $Feret_{min}$ ) диаметры  $Feret$  проекции зерна и его высоту. Заметим, что согласно стандарту [7] максимальный диаметр  $Feret$  соответствует длине проекции зерна, минимальный является аналогом ширины проекции зерна. Шестым унаследованным фактором предложенной модели является форма рельефа проекции. Его можно квалифицировать как неявный, поскольку в принятой модели он не имеет числового выражения, но, тем не менее, влияет на форму поверхности 3D модели зерна и ее геометрические параметры – площадь поверхности и объем. Алгоритмы построения предложенной новой 3D модели зерна, а также расчетного определения площади поверхности объема подробно изложены в [8]. Отметим, что

впервые как инструмент построения предложено использовать математический аппарат отображения аффинного пространства [9]. Как отображающие операторы используются плоская гомотетия и параллельный перенос. Коэффициент гомотетии определяется при условии, что траекторией такого сложного результирующего движения (параллельный перенос + гомотетия) каждой точки прообраза является эллипс. Прообразом отображения – контур изображения зерна, наблюдаемого в микроскоп. В результате получаем пространственное эллипсоидовидное тело, показанное на рисунке.



*Принятая 3D модель зерна порошка СТМ в форме эллипсоидовидного тела*

Новая 3D модель впервые была применена при разработке экстраполяционно-аналитического метода определения внешней удельной поверхности порошков СТМ, в частности СА. Как показало тестирование [8], использование предложенной 3D модели зерна с увеличенным количеством унаследованных факторов позволяет существенно (в 4–5 раз) уменьшить погрешность расчетного определения внешней удельной поверхности по сравнению с моделью в форме сферы.

Еще одним примером эффективного приложения новой 3D модели зерна является разработка не имеющего аналогов экстраполяционно-геометрического метода определения насыпной плотности порошков СА и других СТМ [10]. Погрешность метода при свободной засыпке составляет 1,89–2,24%, при засыпке с утряской – 9,56%.

В настоящей работе приводятся результаты применения новой 3D модели зерна к расчетному определению количества зерен порошков СА в одном их карате. Количество зерен в одном карате наряду с удельной поверхностью, прочностью и зернистостью является важнейшей характеристикой алмазного порошка, которую необходимо учитывать в исследованиях при разработке алмазно-абразивного инструмента [1]. Точно зная количество зерен в одном карате, а следовательно, и в 1 см<sup>3</sup> алмазосносного слоя, можно рассчитать количество режущих зерен, приходящихся на единицу поверхности алмазосносного слоя в зависимости от зернистости, концентрации и марки алмаза [3]. Располагая этими данными и изучив работу единичного зерна, можно от экспериментального подбора алмазно-абразивного инструмента для различных условий работы перейти к теоретическому расчету, обеспечивающему наиболее эффективное его использование для конкретных условий обработки.

Прямые методы определения количества зерен порошков СТМ в одном их карате (т. е. непосредственный подсчет) трудоемкие, особенно для мелкозернистых порошков. В этой связи актуальной является разработка методик косвенного определения этой характеристики. Общая методологическая схема такого определения следующая. Проводят микроскопический анализ определенного количества (пробы) зерен порошка на предмет определения длины и ширины их проекции. Далее в соответствии с принятой 3D моделью зерна определяют суммарный объем проанализированных зерен, умножением которого на плотность материала исследуемого порошка СТМ находят его массу. Затем рассчитывают среднюю массу одного зерна. Разделив массу одного карата порошка (0,2 г) на среднюю массу одного зерна получают искомое количество зерен порошка СТМ в одном его карате. По описанной схеме определяли количество зерен шлифпорошков СА в одном их карате с использованием предложенной новой 3D модели зерна. Исследовали шлифпорошки зернистостью 40/45, 35/40, 30/35 и 25/30 (в мешах), что соответствует зернистостям 425/355, 500/425, 600/500 и 710/600 в мкм. Необходимые для построения этой модели зерна исходные данные получали на приборе DiaInspect.OSM [11]. Для каждого из исследованных шлифпорошков находили также количество зерен в одном карате путем непосредственного

подсчета. Результаты непосредственного подсчета количества зерен в одном карате шлифпорошков, рассчитанное их количество с использованием новой 3D модели зерна, и погрешность расчетного определения ( $\Delta, \%$ ) приведены в таблице.

**Экспериментальные и расчетные данные по количеству зерен в одном карате шлифпорошков синтетического алмаза некоторых марок и зернистостей**

Марка и зернистость шлифпорошка, меш (мкм)	Количество зерен в одном карате, шт.		$\Delta, \%$
	экспериментальное	расчетное	
АС32 40/35 (425/355)	1395	1366,20	2,60
АС32 35/40 (500/425)	969	989,03	2,06
АС200 30/35 (600/500)	585	579,24	0,98
АС200 25/30 (710/600)	325	320,98	1,23

Результаты сравнительного анализа показывают, что погрешность расчетного определения не превышает 3%. Такой уровень точности расчетного определения [3] можно квалифицировать как довольно высокий.

*Запропонована нова 3D модель зерна порошків надтвердих матеріалів. Подаються приклади та результати її застосування до розв'язання конкретних задач діагностики характеристик порошків синтетичного алмазу.*

**Ключові слова:** порошки надтвердих матеріалів, 3D модель зерна, діагностика характеристик.

*The papers puts forward new 3D model of grain of superabrasive powders. We give the examples and results of 3D model application to solving the concrete problems of diagnostic of superabrasive powders characteristics.*

**Key words:** superabrasive powders, 3D model of grain, superabrasive powders, diagnostic of characteristics.

**Литература**

1. Бакуль В. Н. Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 4. – С. 22–27.
2. Бакуль В. Н. Определение числа частиц в одном карате алмазного порошка. – К.: УкрНИИНТИ, 1966. – 10 с.
3. В. Н. Бакуль, И. П. Захаренко, Я. А. Кункин, М. З. Мильштейн // Справочник по алмазной обработке – К.: Техника, 1971. – 208 с.
4. Лавриненко В. И., Шепелев А. А., Петасюк Г. А. Модели формы зерен СТМ // Сверхтвердые матер. – 1994. – № 5/6. – С. 18–21.
5. Паничкина В. В., Уварова И. В. Методы контроля дисперсности и удельной поверхности металлических порошков. – К.: Наук. думка, 1973. – 167 с.
6. Лошак М. Г. Экспертиза и диагностика сверхтвердых материалов и твердых сплавов // Инструмен. світ. – 2002. – № 2(14). – С. 38–40.
7. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови – К.: Вид-во Держстандарту України, 1995. - Увед. 01.01.96.
8. Петасюк Г. А., Богатырева Г. П. Экстраполяционно-аналитический метод определения удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // Сверхтвердые матер. – 2007. – № 6. – С. 65–76.
9. Перепелица Б. А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Харьков: Высш. шк., 1981. – 107 с.
10. 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. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – Вып. 13. – С. 375–380.
11. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Industrial diamond rev. – 2006. – N 1. – P. 42–47.

Поступила 26.04.11