

# Инструмент, порошки, пасты

---

УДК 621.921.34:666.233.08374

Г. А. Петасюк, Ю. В. Сирота (г. Киев)

## **Аналитическое определение количества зерен в одном карате алмазного порошка на основе экстраполяционно-аффинной 3D-модели зерна**

*Разработан новый метод аналитического определения количества зерен в одном карате алмазного порошка, основанный на предложенной экстраполяционно-аффинной 3D-модели зерна. Приведены результаты тестирования метода на илифпорошках синтетического алмаза. Среднее значение относительной погрешности на 11-ти тестовых порошках составило 1,34 %, максимальное – 3 %.*

**Ключевые слова:** порошки синтетического алмаза, 3D-модель зерна, количество зерен в одном карате, аналитическое определение, тестирование, относительная погрешность

Число зерен в одном карате наряду с удельной поверхностью, прочностью и зернистостью принадлежит к наиболее важным характеристикам алмазного порошка, которые необходимо учитывать при проведении различных исследований и разработке алмазно-абразивного инструмента [1]. Точно зная число зерен в одном карате, а следовательно, и в  $1 \text{ см}^3$  алмазоносного слоя, можно рассчитать количество режущих зерен, приходящихся на единицу поверхности алмазоносного слоя в зависимости от зернистости, концентрации и марки алмаза [2]. В [3, 4] такие зерна именуют активными. Там же предложена формула для расчетного определения их количества в зависимости от числа зерен в одном карате абразивного порошка, их величины (размера) и концентрации в режущем слое круга. Располагая данными о числе зерен в одном карате порошка и изучив работу единичного зерна, можно от экспериментального подбора алмазно-абразивного инструмента для различных условий работы перейти к теоретическому расчету всех необходимых параметров, обеспечивающих наиболее эффективное его использование для конкретных условий обработки [5–7].

Определение зависимости фактического числа зерен (частиц) алмаза, содержащихся в одном карате, от зернистости алмазного порошка необхо-

димо для правильного и обоснованного подхода к разработке эффективно-го алмазно-абразивного инструмента и выбора оптимальной консистенции алмазных паст. Кроме того, количество зерен, содержащихся в одном карате алмазного порошка данной зернистости, наряду с характеристиками режущего слоя круга существенно влияет на число активных зерен и это может быть использовано для оптимизации технологических процессов алмазной обработки.

Экспериментальное определение числа зерен в одном карате (0,2 г) сводится к непосредственному их подсчету под микроскопом в предварительно отвешенной пробе. Такой метод является длительным и трудоемким даже для крупнозернистых шлифпорошков синтетического алмаза (СА), число зерен которых в одном карате не превышает 1000 шт., кроме того, процедура подсчета подвержена влиянию субъективного фактора. Для микропорошков СА, число зерен которых в одном карате исчисляется миллионами, такой непосредственный подсчет становится нереальным. Альтернативой экспериментальному является расчетное определение числа зерен в одном карате.

Идея расчетного определения числа зерен в одном карате алмазных и других абразивных порошков базируется на опосредствованном определении массы пробы зерен через их суммарный объем и удельный вес по результатам диагностики размерных характеристик. Общими методологическими атрибутами методов расчетного определения числа зерен в одном карате являются 3D-модель зерна и соответствующая ей расчетная формула. Из этих двух факторов независимым (основным) является первый. Расчетные формулы при конкретизации объема через размерные характеристики зерна являются производными от выбранной модели. Если не прибегать к такой конкретизации, то имеем одну расчетную формулу для всех методов аналитического определения числа зерен  $n$  в одном карате. Такую формулу выводят путем приведения количества  $N$  испытанных зерен пробы порошка, массу которых определяют умножением суммарного их объема  $V$  на удельный вес  $\gamma$  синтетического алмаза, к весу  $P$ , равному 1 карат:

$$n = \frac{NP}{V\gamma}. \quad (1)$$

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ, АДАПТАЦИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ 3D-МОДЕЛЕЙ

Точность расчетной формулы (1) зависит от отклонения идеализированного аналога зерна от его фактической формы. Степень такого совпадения будем называть адекватностью той или иной 3D-модели. С целью уменьшения погрешности конечного результата, поскольку форма (а с ней объем и масса) зерен реального порошка отлична от идеальной, в формулу (1) иногда вводится поправочный эмпирический коэффициент.

Из анализа (1) следует, что изложение расчетных методов определения числа зерен в одном карате должно содержать описание принятой 3D-модели зерна. Предусматривается также разработка и описание алгоритма вычисления объема принятой 3D-модели зерна и конкретизация с учетом этого формулы (1). Последний этап возможен в том случае, если в качестве аналога выбираются пространственно-геометрические тела правильной формы с известными формулами для вычисления объема (например, куб, шар, трехосный эллипсоид и др.). В противном случае формула не допускает конкрети-

зации, в частности, когда объем находится численно, т. е. в виде конкретного числового значения.

Известные методы теоретического определения числа зерен в одном карате алмазного порошка основаны на уподоблении формы зерна кубу, шару или эллипсоиду [8, 9]. Из этих трех тел наиболее близким (адекватным) пространственно-объемным 3D-аналогом зерна порошков СА, как отмечается в [1, 5], является трехосный эллипсоид. Это было подтверждено экспериментально-аналитическими исследованиями на количественном уровне [10]. Отметим, что в теоретических исследованиях процессов алмазно-абразивной обработки используют и другие 3D-модели абразивных зерен – полные и усеченные пирамиды, конусы и др. Более полная информация по этому вопросу, включая и библиографию, представлена в [10].

Для удобства сравнительного анализа 3D-моделей зерна введем понятие кратности их параметров. 3D-модели в форме куба или шара являются однопараметрическими. В первом случае единственным определяющим параметром является ребро куба, во втором – диаметр или радиус шара. Примерами двухпараметрических 3D-моделей зерна являются параллелепипед с основанием в форме квадрата, прямой круговой цилиндр, эллипсоид вращения. Модель в форме трехосного эллипсоида является трехпараметрической, а определяющими параметрами выступают полуоси эллипсоида. Непосредственному использованию 3D-модели зерна в различных прикладных задачах предшествует процедура ее адаптации к реальному порошку в соответствии с геометрической формой модели. Такая адаптация (настройка) сводится к отождествлению параметров выбранной 3D-модели зерна с фактическими размерными и (или) геометрическими характеристиками его проекции. Можно говорить о том, что в результате такого отождествления принятая 3D-модель зерна порошков унаследует от зерна некоторые реальные или псевдореальные (виртуальные) размерные и геометрические характеристики. Понятно, что чем больше 3D-модель унаследовала реальных характеристик зерна, тем она более адекватна. Под термином реальные здесь подразумеваются характеристики, которые могут быть измерены непосредственно – либо с помощью измерительных инструментов (приборов), либо широко распространенными сейчас методами цифровой обработки изображений. Примерами реальных характеристик зерен могут служить, например, длина и ширина проекции, высота зерна, площадь и периметр проекции. В то же время такие часто используемые на практике характеристики зерен, как средний или эквивалентный диаметр зерен и их средний взвешенный кубический размер, являются примерами псевдореальных характеристик. Такое название отражает тот факт, что ни одна из этих характеристик не может быть непосредственно измерена, поскольку у реальной сферы нет ни среднего, ни эквивалентного диаметров, а есть просто диаметр, так же как и у реального куба нет среднего кубического размера, а есть длина ребра. Средний и эквивалентный диаметры и средний кубический размер являются абстрактными понятиями. Первые две характеристики определяются соответственно как среднее арифметическое длины и ширины проекции зерна и как диаметр круга, площадь которого равна площади проекции зерна. Обычно на практике для 3D-модели в форме куба адаптация осуществляется либо по обобщенному среднему размеру зерен [8], либо по площади проекции [9], для модели в форме шара – обычно по площади проекции [9].

Пространственно-геометрическая модель зерна в форме трехосного эллипсоида унаследует три характеристики фактического зерна – длину и ши-

рину его проекции и высоту. Отметим также и то, что после исследований, представленных в [1, 5], не было предложено более адекватной 3D-модели зерна, количество унаследованных фактических параметров которой было бы больше трех.

Использование упоминавшихся выше известных 3D-моделей при расчете числа зерен в одном карате порошков СА приводят к ошибкам до десятков процентов [5]. Даже в случае наиболее близкого аналога зерна – эллипсоида – получаем недопустимо большую ошибку расчетного определения числа зерен в одном карате. Так, для порошка АСО (по действующему на сегодня стандарту [11] – АС2) зернистостью 160/125 со средними размерами зерна 242, 178 и 112 мкм ошибка расчетного определения числа зерен в одном карате составляет 38 % [5]. Это не позволяет использовать полученные данные ни для теоретических исследований, ни для практических расчетов.

В [8] приведена методика определения числа зерен алмазного порошка, содержащихся в одном карате с учетом фактической формы зерен. Методика основана на однопараметрической 3D-модели зерна в форме куба. Форму зерна учитывали введением поправочного эмпирического коэффициента, названного коэффициентом заполнения объема  $K$ . Согласно этой методике, число зерен алмазного порошка, содержащихся в одном карате, определяется по формуле

$$n = \frac{P}{K\gamma d_{с.п}^3}, \quad (2)$$

где  $d_{с.п}$  – средний взвешенный кубический размер зерна, мкм:

$$d_{с.п} = \sqrt[3]{\frac{d_{с.к}^3 P_k + d_{с.о}^3 P_o + d_{с.д}^3 P_d + d_{с.м}^3 P_m}{100}}, \quad (3)$$

$d_{с.к}$ ,  $d_{с.о}$ ,  $d_{с.д}$ ,  $d_{с.м}$  – средний кубический размер зерна соответственно крупной, основной, дополнительной и мелкой фракции;  $P_k$ ,  $P_o$ ,  $P_d$ ,  $P_m$  – содержание в данном порошке соответственно крупной, основной, дополнительной и мелкой фракции, %. С учетом того, что  $P = 200$  мг, а  $\gamma = 3,53 \cdot 10^9$  мг/мкм<sup>3</sup> формула (2) приобретает вид

$$n = \frac{56,6 \cdot 10^9}{K d_{с.п}^3}. \quad (4)$$

В [9] описана методика расчета числа частиц в одном карате, ориентированная на современные средства автоматизированной диагностики морфометрических характеристик абразивных порошков. Предложены два варианта формулы для вычисления количества зерен в одном карате шлифпорошков СА, которые можно представить в виде

$$n = \frac{0,2 N}{\gamma \sum_{i=1}^N A_i^{3/2}}; \quad (5)$$

$$n = \frac{0,15 N \sqrt{\pi}}{\gamma \sum_{i=1}^N A_i^{3/2}}, \quad (6)$$

где  $A_i$  – площадь проекции зерна;  $N$  – количество продиагностированных зерен;  $\pi$  – математическая константа. Формула (5) основана на 3D-модели зерна в форме куба, формула (6) – в форме шара. Первая из этих формул рекомендуется для кристаллов с ориентацией решетки 100, вторая – с ориентацией 111. Проведенные в [9] исследования на экспериментальных данных показали, что погрешность формул (5), (6) зависит от зернистости шлифпорошка и составляет 15–24 %, причем для модели в форме куба тенденция изменения погрешности такова, что она меньше для более крупных частиц. Для 3D-модели зерна в форме шара эта тенденция имеет противоположный характер. Даже если исходить из минимальной погрешности, то она все же является большой. К тому же проблематичной является сама процедура практической идентификации типа кристаллографической решетки и автоматизации этого процесса с учетом большого количества анализируемых зерен.

Возвращаясь к формуле (4), которая, несмотря на узкий диапазон применимости, до настоящего времени оставалась наиболее точной, остановимся более подробно на определении значения коэффициента  $K$ . Для зерен крупных алмазных порошков зернистостью 500/400, 400/315, 315/250, 250/200, 200/160 число частиц в одном карате которых легче сосчитать, значение коэффициента  $K$  колеблется в интервале от 0,161 до 0,228, а среднее значение равно 0,192. Для практических расчетов рекомендуется принимать  $K = 0,2$  [8]. Погрешность основанного на таком подходе метода составляет 10–15 %.

При всех достоинствах формулы (4) в ее структуре есть логическое несоответствие. Так, с одной стороны, для определения числа зерен в одном карате порошка необходимо располагать значением коэффициента  $K$ , с другой – установление его значения связано с предварительным подсчетом количества зерен в одном карате порошка, к которому применяют формулу (4). Последствием этого методического противоречия является то, что формула (4) применима только к тем порошкам, для которых экспериментально установлено значение  $K$ . В данном случае – для синтезированных по конкретной технологии стандартных шлифпорошков СА указанных выше зернистостей, для которых можно воспользоваться рекомендуемым в [8] значением  $K$ .

Формула (4) была предложена еще в начале 70-х годов прошлого столетия. С тех пор и до исследований, представленных в [9], вопросу расчетного определения числа зерен в единице веса порошков сверхтвердых материалов (СТМ) вообще и алмаза в частности достаточного внимания не уделяли. Следует также иметь в виду, что диапазон практического применения формулы (4) ограничивается, с одной стороны, порошками известных на то время марок АСО, АСК, АСВ, АСП и АСР (по стандарту [11] – АС2, АС4, АС6, АС6 и АС15 соответственно), с другой – зернистостями 500/400–200/160. Именно путем экспериментального анализа для этого диапазона марок и зернистостей стандартных шлифпорошков СА было установлено указанное выше значение коэффициента  $K$ . Однако к настоящему времени создано значительное количество новых марок порошков СА, в том числе высокопрочных. К тому же формула (4) не позволяет производить расчет для шлифпорошков зернистостью 160/125–50/40, а также для микропорошков. Не может она быть применена и к порошкам других СТМ. Таким образом, актуальной задачей является разработка новых методов расчета числа зерен в одном карате порошка СТМ и СА, в частности таких, которые не содержат коэффициент  $K$ , но учитывают форму зерен и, кроме того, пригодны для применения вне зависимости от того, стандартный порошок или нет.

## ЭКСТРАПОЛЯЦИОННО-АФФИННЫЙ МЕТОД

Сформулированным выше условиям удовлетворяет разработанный авторами экстраполяционно-аффинный метод, основанный на новой, одноименной с методом, 3D-модели зерна [12]. Эта модель представляет собой пространственное эллипсоидоподобное тело  $T$  (рисунок, *a*), образованное однопараметрическим отображением замкнутой плоской кривой (рисунок, *b*), называемой прообразом. Фактическим прообразом этого отображения служит контур (граница) проекции зерна. Кроме упоминавшихся выше трех размерных параметров зерна, экстраполяционно-аффинная модель содержит еще следующие: площадь, периметр проекции и фактическую его форму. Такое увеличение количества унаследованных факторов зерна повышает адекватность предложенной модели. Разработан алгоритм построения новой модели, а также методика численного расчета площади ее поверхности и объема.

Предложенная модель базируется на математическом аппарате отображения аффинного пространства [13], а в качестве отображающих операторов 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. Если исходить из других траекторий движения каждой дискретной точки прообраза, то получим иные экстраполяционно-аффинные 3D-модели зерен, например, некруговые цилиндры, сдвоенные по основанию конусы и пирамиды и т. п. Такой подход дает возможность получать на основе предлагаемого подхода 3D-модели зерна других абразивных порошков. Прообразом отображения во всех случаях выступает оцифрованный контур проекции (изображения) зерна, наблюдаемый в поле зрения микроскопа, для которого вводится обозначение  $\Pi_z$  (см. рисунок, *b*). Существенно то, что процедура оцифровки контура является актуальной лишь для визуализации (графической иллюстрации) 3D-формы зерна. При вычислении объема подобная процедура не является обязательной. Проведенный в [14] аналитический анализ показал, что с учетом метрических свойств гомотетии как отображающего оператора в данном случае достаточно информации по площади и периметру проекции зерна, его высоте, максимальному и минимальному диаметрам проекции. Все эти характеристики и входят в число исходных данных, необходимых для построения и обсчета предложенной новой 3D-модели зерна порошков СТМ.

Наиболее эффективным является использование предложенной модели зерна в сочетании с современными компьютерно-техническими средствами автоматизированной диагностики морфометрических характеристик абразивных порошков.

Методика расчетного определения числа зерен в одном карате порошка с использованием предложенной 3D-модели зерна состоит в следующем. Производится диагностика морфометрических характеристик пробы порошка, например, на приборе DiaInspect.OSM фирмы "Vollstaedt Diamant GmbH" [15] или другом, подобном ему по назначению. Получаем файл с числовыми данными по всем диагностируемым морфометрическим характеристикам, включая и необходимые исходные данные, для каждого зерна пробы. Для прибора DiaInspect.OSM – это 1999 зерен. Для каждого зерна определяется его объем. Алгоритм вычисления подробно изложен в [14] и сводится к следующему. Плоскость, в которой лежит это изображение, совмещается с плоскостью  $Y_1 = 0$  (см. рисунок, *b*). Плоскую фигуру, образованную замкнутой кривой  $\Pi_z$ ,



зуют пространственное тело - эллипсоидоподобный пояс, верхнее и нижнее основания которого повторяют форму фигуры  $\Phi_0$ . Принимается, что известны такие параметры фигуры  $\Phi_0$ , как площадь  $S_0$ , минимальный  $d_{\min}$  и максимальный  $d_{\max}$  диаметры, а также высота  $h$  зерна. Измерение фактических показателей этих характеристик можно проводить, например, на упоминавшемся уже видео-компьютерном комплексе DiaInspect.OSM. Можно также использовать и другие, аналогичные по назначению приборы.

Приближенное определение объема эллипсоидоподобного пояса осуществляем, заменяя его срезанным коническим телом с площадью нижнего и верхнего оснований соответственно

$$\begin{aligned} s_{i,m} &= S_0 g^2(y_m); \\ s_{i,m+1} &= S_0 g^2(y_{m+1}) \end{aligned} \quad (7)$$

и высотой  $\Delta y_m$ . Здесь индекс  $i$  – номер анализируемого зерна;  $m$  – номер эллипсоидоподобного пояса. Объем такого конического тела определяется по формуле

$$v_{i,m} = S_0 \Delta y_m \frac{g^2(y_m) + g^2(y_{m+1}) + g(y_m)g(y_{m+1})}{3}. \quad (8)$$

Полный объем одного зерна как эллипсоидоподобного тела выражается зависимостью

$$V_i = 2 \sum_{m=1}^M v_{i,m}, \quad (9)$$

где  $M$  количество эллипсоидоподобных поясов. Выполнив такую процедуру для каждого зерна пробы, получим суммарный объем  $V_{\Sigma}$  всех продиагностированных зерен. Далее находим средний объем одного зерна. С учетом того, что объем при таком подходе представить в аналитическом виде сложно, общая формула для вычисления числа зерен в одном карате порошка не допускает конкретизации и представляется в виде, аналогичном (1):

$$n = \frac{NP}{V_{\Sigma} \gamma}, \quad (10)$$

где размерности величин такие же, как и в (1). Формула (10) может быть преобразована к виду

$$n = \frac{P}{\left[ \frac{n_1 m_1}{N_1} + \frac{n_2 m_2}{N_2} + \frac{n_3 m_3}{N_3} + \frac{n_4 m_4}{N_4} + \frac{n_5 m_5}{N_5} \right] V_{\Sigma} \gamma}, \quad (11)$$

где  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  – относительная массовая доля зерен фракций порошка (1 – мелкой, 2 – дополнительной к основной, 3 – основной, 4 – крупной, 5 – предельной);  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  – абсолютное количество зерен в каждой из фракций;  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$  – относительное количество зерен по фракциям. Формула (11) является более наглядной, поскольку дает представление, какие факторы влияют на количество зерен в определенной массе порошка, в данном случае – в одном карате. Однако формула (10) менее сложна и поэтому более удобна для практического пользования. С точки зрения конечного ре-

зультата, с учетом того, что  $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 = 1$ , эти две формулы абсолютно равносильны.

### РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МЕТОДИКИ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Апробацию экспериментально-аффинного метода проводили сравнением вычисленного по формуле (10) числа зерен в одном карате порошка СА с опубликованными в научно-технической литературе, а также с собственными экспериментальными данными. В качестве известных экспериментальных были использованы данные [1, 8, 16], из которых наиболее информативны [8]. Они более пригодны для тестирования, поскольку, кроме марки и ситовой зернистости порошка, авторы приводят информацию и о количестве зерен во фракциях. Именно от этих показателей, как следует из количественного анализа экспериментальных данных [8], подтверждаемого и формулой (11), существенно зависит число зерен в одном карате. Так, например, для шлифпорошка марки АСК зернистостью 400/315 при  $n_1 = 0,03$ ,  $n_2 = 0,31$ ,  $n_3 = 0,59$ ,  $n_4 = 0,07$ ,  $n_5 = 0$  значение  $n = 1816$ , а при  $n_1 = 0,01$ ,  $n_2 = 0,19$ ,  $n_3 = 0,73$ ,  $n_4 = 0,07$ ,  $n_5 = 0$  получаем  $n = 1516$ . Разность составляет 300 зерен (16,52 %), что весьма существенно. Результаты тестирования представленного метода на шлифпорошке АСК зернистостей 400/315, 315/250 и 250/200 с известным относительным количеством зерен по фракциям [8] приведены в табл. 1. Авторы располагали абсолютными аналогами данных шлифпорошков как по марке, так и по их производителю. Исходные данные для расчета числа зерен в одном карате были получены на приборе DiaInspect.OSM. Обеспечение нужного количества зерен по фракциям тестируемого шлифпорошка осуществляли методом компьютерного диагностического сита [17], который позволяет одновременно с определением показателей ситового зернового состава осуществлять подсчет и количества зерен в выделенных фракциях. Менее информативны экспериментальные данные [1, 16], приведенные в соответствии со стандартом ГОСТ 9206–70, но без указания показателей зернового состава шлифпорошков. Отметим, что заложенные в данном стандарте нормы по ситовому зерновому составу шлифпорошков полностью перешли в ныне действующий стандарт [11].

**Таблица 1. Экспериментальные и расчетные данные по числу зерен  $n$  в одном карате шлифпорошка АСК в зависимости от относительного количества зерен по фракциям**

Зернистость, мкм	Эксперимент	Расчет		Относительное количество зерен шлифпорошка тестируемого (в числителе) и тестового (в знаменателе) по фракциям				
		$n$ , шт.	относительная погрешность, %	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$
400/315	1580 [8]	1577	0,22	0	0,2200	0,7209	0,0591	0
				0	0,2200	0,7200	0,0600	0
315/250	3410 [8]	3100	9,09	0,0201	0,2006	0,6791	0,1003	0
				0,0200	0,2000	0,6800	0,1000	0
250/200	6920 [8]	6510	5,92	0	0,2930	0,7209	0,0591	0
				0	0,3000	0,7200	0,0600	0

Результаты расчета вместе с соответствующими им экспериментальными данными представлены в табл. 2. Там же приведена дополнительная информация о порошках: марка, зернистость, показатели ситового зернового состава фактические и предусмотренные стандартом [11]. Фактические показатели зернового состава определяли расчетным путем по методике [17].

**Таблица 2. Экспериментальные и расчетные данные по числу зерен  $n$  в одном карате, фактические и требуемые стандартом [11] показатели зернового состава тестируемых шлифпорошков синтетического алмаза**

Марка и зернистость, мкм	Эксперимент $n$ , тыс. шт.	Расчет		Фактические (в числителе) и требуемые стандартом ДСТУ 3292 (в знаменателе) показатели ситового зернового состава, %				
		$n$ , тыс. шт.	относительная погрешность, %	Мф	Дф	Оф	Кф	Пф
АС2	386 [1]	392,52	1,55	<u>0</u>	30,92	<u>67,66</u>	<u>1,43</u>	<u>0</u>
63/50	408 [16]		3,79	$\leq 2$		$\geq 70$	$\leq 15$	$\leq 0,1$
АС2	213 [1]	201,18	5,55	<u>0,87</u>	30,61	<u>68,26</u>	<u>0,26</u>	<u>0</u>
80/63	217 [16]		7,29	$\leq 2$		$\geq 70$	$\leq 15$	$\leq 0,1$
АС4	32,5 [1]	35,001	7,69	<u>1,67</u>	25,49	<u>62,34</u>	<u>9,01</u>	<u>1,38</u>
160/125	32,5 [16]		7,69	$\leq 2$		$\geq 70$	$\leq 15$	$\leq 0,1$
АС15	341 [1]	348,05	2,07	<u>0</u>	18,15	<u>72,27</u>	<u>9,58</u>	<u>0</u>
63/50	333 [3]		4,52	$\leq 2$		$\geq 70$	$\leq 15$	$\leq 0,1$
АС15	183 [1]	196,78	3,23	<u>0</u>	18,74	<u>77,50</u>	<u>3,77</u>	<u>0</u>
80/63	183 [3]		3,23	$\leq 2$		$\geq 70$	$\leq 15$	$\leq 0,1$
АС50	2,25 [1]	2,1614	3,94	<u>1,21</u>	36,86	<u>61,15</u>	<u>0,78</u>	<u>0</u>
400/315				$\leq 2$		$\geq 80$	$\leq 10$	$\leq 0,1$
АС50	4,19 [1]	3,8621	7,64	<u>0,44</u>	30,73	<u>67,41</u>	<u>1,42</u>	<u>0</u>
315/250				$\leq 2$		$\geq 70$	$\leq 15$	$\leq 0,1$
АС50	7,81 [1]	7,5437	3,33	<u>0,18</u>	29,63	<u>60,66</u>	<u>2,26</u>	<u>1,13</u>
250/200				$\leq 2$		$\geq 70$	$\leq 15$	$\leq 0,1$

Примечание. Мф – мелкая, Дф – дополнительная к основной, Оф – основная, Кф – крупная, Пф – предельная фракции.

Проведена также проверка разработанного метода на экспериментальных данных, полученных авторами. Эксперименты проводили на шлифпорошках АС200 40/45 (в меш, соответствует зернистости 425/355 в мкм), АС250 40/45 (425/355), АС32 40/45 (425/355), АС300 35/40 (500/425), АС32 35/40 (500/425), АС200 30/35 (600/500), АС200 25/30 (710/600), АС200 20/25 (800/710). С точностью до  $10^{-4}$  г на высокоточных аналитических весах ABS 120-4 взвешивали по одному карату каждого контрольного шлифпорошка, затем под микроскопом МБИ-6 производили подсчет зерен. Параллельно осуществляли диагностику морфометрических характеристик контрольных шлифпорошков на приборе Dialnspect.OSM. Затем с использованием данных

DiaInspect-диагностики проводили вычисление объема каждого зерна из продиагностированной их пробы и находили суммарный объем всех зерен.

Значение высоты зерен, необходимой для вычисления их объема, выполняли по следующей методике. Полагали, что высота  $h$  зерен связана с минимальным диаметром Feret  $F_{\min}$  зависимостью

$$h = k_h F_{\min}, \quad (12)$$

где  $k_h$  – коэффициент пропорциональности. Его значения определяли следующим образом. На приборе DiaInspect.OSM в мультифокусном режиме измеряли  $h$  и  $F_{\min}$  20–30 зерен. Находили средние ( $h_c$  и  $F_{\min c}$ ) значения указанных размерных параметров и их отношение  $k_h = h_c / F_{\min c}$ . Найденное таким методом  $k_h$  использовали для определения высоты каждого зерна (из продиагностированной на приборе DiaInspect.OSM пробы).

Полученные по описанной выше методике значения коэффициента пропорциональности и количество  $N_h$  измеренных при его определении зерен для каждого контрольного шлифпорошка приведены в табл. 3. Там же указаны экспериментальные данные авторов по числу зерен в одном карате исследованных шлифпорошков СА, а также общее количество  $N$  зерен данного шлифпорошка, продиагностированных на приборе DiaInspect.OSM, на основании которых производили расчет числа зерен в одном карате.

Одновременно с экстраполяционно-аффинной 3D-моделью зерна проводили также расчеты для 3D-моделей в форме трехосного эллипсоида, куба и шара (табл. 3). Сравнительный анализ представленных в табл. 3 результатов показывает, что предложенный метод дает наименьшую погрешность расчетного определения числа зерен в одном карате шлифпорошков СА. Среднее значение погрешности составляет 1,34 %, максимальное – не превышает 3 %. Достигнутый уровень точности на основании оценок [8] можно квалифицировать как очень высокий. Такая точность достигнута благодаря использованию новой экстраполяционно-аффинной 3D-модели зерна и современных средств диагностики морфометрических характеристик абразивных порошков. 3D-модель зерна в форме трехосного эллипсоида дает менее точные, но приемлемые для практики результаты – погрешность составляет 5,28 и 9,18 % соответственно. Что касается остальных 3D-моделей зерна, то их использование приводит к очень большой (шар) и недопустимо большой (куб) погрешностям расчетного определения числа зерен в одном карате.

## ВЫВОДЫ

Новый экстраполяционно-аффинный метод аналитического определения числа зерен в одном карате порошков СТМ, предложенный в работе, основан на использовании оригинальной 3D-модели зерна. В качестве исходных данных для ее построения и обсчета используются линейные размеры и площадь проекции каждого зерна проанализированной их пробы.

Экстраполяционно-аффинная 3D-модель зерна обладает большим числом унаследованных от реального зерна характеристик по сравнению с другими известными 3D-моделями. Ее математическое описание позволяет на индивидуальном уровне частично учитывать фактическую форму зерен (в одной проекции), благодаря этому существенно уменьшается погрешность компьютерно-аналитической диагностики характеристик порошков СТМ.

Применение новой 3D-модели зерна и предложенного метода расчетного определения числа зерен в одном карате порошка СА уменьшило среднюю погрешность расчета до 1,34 % при максимальном ее значении – 3 % (для 3D-

модели в форме трехосного эллипсоида эти показатели составляют 5,28 и 9,18 % соответственно). Для остальных исследуемых 3D-моделей эта погрешность существенно больше.

**Таблица 3. Экспериментальные и расчетные (при различных 3D-моделях зерна) данные по числу зерен  $n$  в одном карате шлифпорошков высокопрочных марок и зернистостей, относительная погрешность  $\Delta$  расчетного определения и результаты экспериментального определения коэффициента пропорциональности  $k_h$  в формуле (12)**

Марка и зернистость, мкм (меш)	N, шт.	Экс- пе- ри- мент	Расчет										$k_h$	$N_h$ , шт.
			экстраполя- ционно- аффинная модель	эллипсоид		сфера		куб						
				n, шт.	$\Delta$ , %	n, шт.	$\Delta$ , %	n, шт.	$\Delta$ , %	n, шт.	$\Delta$ , %			
АС300 425/355 (40/45)	232	1395	1366,2	2,06	1320	5,34	1151,1	17,48	602,69	56,79	0,89	24		
АС250 425/355 (40/45)	235	1493	1503,1	0,67	1461,1	2,14	1217,3	18,46	637,36	57,31	0,85	11		
АС32-Н 425/355 (40/45)	212	1794	1781,3	0,71	1656,9	7,64	969,72	45,9	507,74	71,69	0,59	20		
АС300 500/425 (35/40)	288	969	989,03	2,06	955,09	1,43	795,47	17,91	416,51	57,01	0,85	12		
АС32 500/425 (35/40)	278	998	990,16	0,8	906,38	9,18	575,72	42,31	301,45	69,79	0,70	12		
АС200 600/500 (30/35)*	122	585	579,24	0,98	556,21	4,92	491,20	16,03	257,19	56,03	0,89	22		
	111	568	566,25	0,35	526,32	7,34	340,62	40,03	178,35	68,60	0,66	22		
	157	485	496,84	2,44	464,49	4,23	464,89	4,15	243,42	49,80	1,03	20		
АС200 710/600 (25/30)*	101	380	373,16	1,8	360,87	5,03	299,37	21,22	156,75	58,75	0,85	27		
	92	325	320,99	1,23	305,82	5,90	273,84	15,74	143,38	55,88	0,91	15		
АС200 800/710 (20/25)	97	234	231,5	1,07	224,1	4,22	196,60	16,24	102,94	56,01	0,90	25		

\* Порошки из различных партий.

Предложенный метод расчетного определения количества зерен в одном карате порошков СА является наиболее точным и может быть рекомендован для практического применения не только для алмазных, но и других абразивных порошков.

Авторы благодарят ведущего инженера Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины Т. А. Косенчук за помощь в проведении экспериментальных исследований.

*Розроблено новий метод аналітичного визначення кількості зерен в одному караті алмазного порошку, заснований на запропонованій екстраполяційно-афінній 3D-моделі зерна. Подано результати тестування методу на шлифпорошках синтетично-*

го алмазу. Середнє значення відносної похибки на 11-ти порошках, що тестувалися, складо 1,34 %, максимальне – 3 %.

**Ключові слова:** порошки синтетичного алмазу, 3D-модель зерна, кількість зерен в одному караті, аналітичне визначення, тестування, відносна похибка.

*A new method for analytical determination of the number of particles per carat for diamond powders has been elaborated which is based on an extrapolation-affine 3D grain model. The paper provides some results of testing the method on synthetic diamond grinding powders. The mean value of relative error as obtained on eleven test powders was 1.34%, the maximum value being 3%.*

**Keywords:** synthetic diamond powders, 3D grain model, number of grains per carat, analytical determination, testing, relative error.

1. Бакуль В. Н. Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка // Синт. алмазы. – 1976. – Вып. 4. – С. 22–27.
2. Узунян М. Д. Теоретический анализ и расчет количества зерен на рабочей поверхности алмазного круга // Резание и инструмент. – 1978. – Вып. 19. – С. 75–82.
3. Engels A. The role of particles per carat in diamond tool behaviour // Ind. Diamond Rev. – 2003. – 63, N 2. – P. 39–45.
4. Engels J. A., Fish M. L., Morrison G., Wright D. N. Einfluss der Eigenschaften von Diamant-Sägekörnungen auf das Verschleißverhalten in der Anwendung // Industrie Diamanten Rundschau. – 2003. – 37, N 4. – S. 308–316.
5. Бакуль В. Н. Определение числа частиц в одном карате алмазного порошка. – Киев: УкрНИИИТИ, 1966. – 10 с.
6. Щоголев А. Г., Полупан Б. И., Коломиец В. В. Определение количества зерен по глубине рабочего поверхностного слоя алмазного инструмента // Синт. алмазы. – 1979. – Вып. 3. – С. 19–25.
7. Зайцев А. Г. Разработка теории ориентации алмазных зерен в электромагнитном поле // Сверхт. материалы. – 1983. – № 3. – С. 31–38.
8. Бакуль В. Н., Захаренко И. П., Кункин Я. А., Мильштейн М. З. Справочник по алмазной обработке. – Киев: Техника, 1971. – 208 с.
9. List E., Vollstaedt H., Frenzel J. Counting particles per carat by means of two-dimensional image analysis // 5th Zhengzhou Int. Superhard Materials and Related Products Conf. – <http://www.vdiamant.de/Download/particles%20per%20carat%20ZISC-2008.pdf>
10. Лавриненко В. И., Шепелев А. А., Петасюк Г. А. Модели формы зерен СТМ // Сверхт. материалы. – 1994. – № 5/6. – С. 18–21.
11. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови: Вид-во Держстандарту України, 1995. – Введ. 01.01.96.
12. 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.
13. Перепелица Б. А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Харьков: Высшая школа, 1981. – 107 с.
14. Петасюк Г. А., Богатирьова Г. П. Экстраполяционно-аналитический метод определения удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // Сверхтв. материалы. – 2007. – № 6. – С. 65–76.
15. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Ind. Diamond Rev. – 2006. – № 1. – P. 42–47.
16. Никитин Ю. И., Уман С. М., Коберниченко Л. В. и др. Порошки и пасты из синтетических алмазов. – Киев: Наук. думка, 1992. – 284 с.
17. Новиков Н. В., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Компьютерное диагностическое сито для идентификации зернистости и зернового состава микроскопических проб алмазных шлифпорошков // Сверхтв. материалы. – 2003. – № 3. – С. 71–83.

Ин-т сверхтвердых материалов  
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 28.12.11