

УДК 621.928.4; 621.921.1:621.922.34

Г. А. Петасюк, канд. техн. наук

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

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕДУРЫ СИТОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПОРОШКОВ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

We propose method of indirect determination of grain size and grain size distribution of SHM grinding powders without control sieve analysis standard procedure. The method is based on mathematical simulation of sieve analysis procedure and application of microscopic analysis data. The results of method testing for standard grinding powders of synthetic diamond are presented.

Введение

Процедура размерной ситовой классификации является одной из основных операций технологии производства и идентификации шлифпорошков сверхтвердых материалов (СТМ). В процессе производства она осуществляется с целью получения ряда фракций порошка с преимущественным размером зерен в определенном диапазоне его изменения. Для удобства изложения такую процедуру в дальнейшем будем называть промышленной классификацией. Повторное обращение к процедуре размерной классификации имеет место в процессе контроля произведенной ранее промышленной классификации и приведения порошка к нормам распространяющегося на него стандарта. Данная задача решается путем сравнительного анализа относительного процентного содержания выделенных фракций и проверке его соответствия требованиям стандарта на контролируемый порошок. Учитывая указанную выше особенность такой классификации, будем называть ее контрольной.

По совокупности применяемых методов испытаний контрольная классификация в теоретическом плане не отличается от промышленной. В обоих случаях вначале решается задача классификации порошка на отдельные фракции. На этом этапе методы испытаний, положенные в основу промышленной классификации, могут быть применены и для контрольной классификации. Однако промышленная классификация собственно и заканчивается выделением фракций. Контрольная же классификация включает кроме этого еще и весовой анализ содержимого полученных фракций, проводимый с целью количественной оценки показателей зернового состава. В этом, а также в более жестких требованиях к техническому состоянию применяемого оборудования, и состоит главное методологическое различие между контрольной и промышленной классификацией. Особенностью контрольной ситовой классификации является еще и то, что она проводится на определенном количестве (пробе) порошка. При этом порядок отбора проб регламентируется нормативными требованиями, призванными обеспечить соблюдение принципа представительности.

Ситовой анализ

Ситовой рассев является самым старым способом размерной классификация дисперсных материалов, практическая актуальность которого не уменьшилась и в настоящее время. Тем более что устройства для отсева и используемые в них сетки постоянно совершенствуются. Все операции ситового анализа – от взвешивания исходной пробы и пустых обечаяк, установки сит, отсева, взвешивания остатков на ситах до подсчета и записи (распечатки) результатов анализа – производятся роботом, управляемым персональным компьютером [1]. Контроль качества выполнения процесса контролируется также автоматом.

Методы диагностики порошков СТМ на предмет зернистости и зернового состава делят на прямые и косвенные [2]. К прямым относится непосредственное измерение размеров частиц с помощью некоторого масштаба, будь то шкала микроскопа (микроскопический анализ) или ячейки сит (ситовой анализ). В случае косвенных методов определение размеров частиц осуществляется по какому-либо признаку, зависящему непосредственно от размеров (например, по скорости оседания в вязкой среде, скорости растворения, отражению света суспензией, адсорбционной способности и др.). К косвенным следует отнести и метод, основанный на математическом моделировании процедуры ситовой классификации.

Детерминированные и случайные факторы ситовой классификации

Основными параметрами ситового разделения являются размер и форма ячеек сит, их модуль, время отсева, техническое состояние сит. Первые три параметра из перечисленной их совокупности следует квалифицировать как детерминированные. Время отсева и техническое состояние сит следует отнести к категории случайных факторов, но полагать, что они являются оптимальными и контролируруемыми.

Контрольный ситовой анализ осуществляется, как известно, с помощью набора контрольных сит. Цель этой диагностической процедуры – разделить порошок на размерные классы и произвести количественную оценку содержимого выделенных фракций по массе содержащихся в них зерен. По результатам такой оценки принимается решение относительно стандартности порошка и, если порошок является таковым, ему присваивается зернистость – по фракции с максимальным значением содержимого. Необходимость косвенного осуществления процедуры контрольного ситового анализа методом математического моделирования обусловлена рядом причин, которые обсуждались в работе [3].

Общая методология построения математической модели процедуры ситовой классификации

Построение математической модели процедуры ситовой классификации порошков СТМ с использованием данных микроскопического анализа включает ряд этапов. На первом из них осуществляется выбор геометрических аналогов ячейки сита и зерна шлифпорошка. Геометрический аналог ячейки реального сита принимается нами либо в форме ромба с длинной стороны l и острым углом 2φ , либо в виде окружности радиуса R . В частности, при $\varphi=45^\circ$ как частный случай имеем ячейку в форме квадрата. Предполагается, что принятая форма ячейки сита в процессе прохождения через нее зерна остается неизменной. В настоящей работе, следуя [4, 5], в качестве геометрической модели зерна принимается трехосный эллипсоид с полуосями a, b, h ($a \geq b \geq h$). На втором этапе устанавливается взаимосвязь между параметрами аналога ячейки сита и размерными характеристиками зерна, аналитическое выражение которой представляет собой математическую модель ситового размерного разделения.

Зависимость, выражающую эту взаимосвязь, выводят из условия предельного (т. е., с касанием) прохождения выбранной модели зерна через принятый аналог ячейки сита. Пример решения подобной задачи применительно к ячейке в форме квадрата описан в [4]. Для принятых здесь геометрических аналогов ячейки сита и геометрической модели зерна условие предельного прохождения сводится к свойству эллипса с полуосями b , h быть вписанным в ромб с длиной стороны l и острым углом 2φ либо в окружность радиуса R . Полученные на базе этого свойства такие математические модели ситового разделения имеют вид

$$l = \frac{\tau \cdot b}{\sin(\varphi)} \sqrt{\operatorname{tg}^2(\varphi) + \mu^2} \quad (1)$$

в первом случае и

$$R = b \quad (2)$$

– во втором.

Здесь l (соответственно R) – длина (радиус) ячейки сита, на котором зерно будет задерживаться;

b – ширина зерна; $\mu = h/b$;

h – высота зерна;

τ – поправочный коэффициент, учитывающий возможное отклонение реальной геометрической формы проекции зерна от принятой его модели.

Установленное в работе [4] значение этого коэффициента для шлифпорошков синтетического алмаза (СА), равняется 0,43785. Общая методология получения подобных зависимостей и математического моделирования процедуры ситовой классификации описаны в [4, 5].

На третьем этапе разрабатываются критерии и алгоритмы различного рода вычислительных и логических процедур, связанных с применением полученной математической модели к решению задачи отнесения зерна к тому или иному классу зернистости и получением количественных оценок содержимого выделенных фракций порошка. В завершение этого этапа создается компьютерное программное обеспечение для автоматизированной реализации разработанных алгоритмов.

В алгоритме косвенного решения задачи ситовой классификации шлифпорошков СА методом математического моделирования с длиной стороны (радиусом) ячейки сита в качестве критериального параметра критерием разделения зерен по размерным классам служит попадание критериального параметра в тот или иной из установленных интервалов стандартных границ фракций порошка. В математическом плане для конкретного зерна это сводится к проверке выполнения условия

$$z_n \leq \beta < z_{n+1}, \quad (1)$$

где β – критериальный параметр,

z_n, z_{n+1} – значения границ интервалов стандартных фракций порошка.

В рассматриваемом случае критериальным параметром выступает длина стороны (радиус) ячейки стандартного сита с номером n и смежного с ним более крупного сита соответственно ($n=1, 2, \dots, N$); N – количество сит стандартного ряда. Зерно относится к той фракции, для которой условие (3) выполняется.

В зависимости от структуры исходных данных может быть два варианта применения этой методики. Первый вариант имеет место, когда известны все три размерных параметра зерен: длина, ширина и высота их проекции. Однако такая ситуация на практике встречается редко. Более типичным является второй вариант, когда известны только длина и ширина проекции зерен, а высота проекции неизвестна. Для такого случая получены эмпирические зависимости [6], позволяющие производить расчетное определение высоты зерна по длине (a) и ширине его проекции:

$$h = A_0 + A_1 \cdot a^{0,3} + A_2 \cdot \sqrt{b} + A_3 \cdot (a/b)^{3,25} + A_4 / [\log(2ab/(a+b))]^{0,2}, \quad (4)$$

где $A_0=2085,3$; $A_1=-663,06$; $A_2=147,32$; $A_3=95,991$; $A_4=-353,38$ – числовые константы.

Зависимость (4) получена путем математической обработки экспериментальных данных [7] по средним значениям всех трех размерных параметров зерен стандартных по [8] шлифпорошков СА. Обработка производилась с использованием разработанной в ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины компьютерной программной системы многовариантного построения и анализа многофакторных эмпирических математических моделей [9].

Для практического применения методики разработано оригинальное компьютерное программное обеспечение. Использование такого компьютерного контрольного сита позволяет на основании только данных по длине, ширине и высоте проекции зерен решать большой круг практических задач [3].

Проверка адекватности разработанного метода

Проверка адекватности допущений, принятых при разработке модели, и оценка погрешностей при практическом использовании полученных аналитических зависимостей, связывающих размерные параметры зерна с характерным геометрическим параметром ячейки сита, проводилась на ситах с ячейками в форме квадрата. Такая форма ячеек является характерной для большинства действующих стандартов на данный вид дисперсных материалов и является частным случаем более общей формы – ромба с острым углом $\varphi=45^\circ$.

Указанная задача решалась путем тестирования предложенного метода на стандартных по стандарту [8] шлифпорошках СА с известными показателями зернового состава и зернистости. Результаты тестирования представлены в таблице.

Результаты расчетного определения показателей зернистости и зернового состава методом математического моделирования шлифпорошков СА некоторых марок и зернистостей

Марка шлифпорошка	Тип показателя	Зернистость, мкм	Показатели зернового состава, %				
			P_ϕ	K_ϕ	O_ϕ	M_ϕ	$O_\phi+Pr_\phi$
АС4	ф	125/100	0	4	84	0	96
	р	125/100	0	6	78	0	94
АС20	ф	100/80	0	2	81	0	98
	р	100/80	0	0	78	1	99
АС65	ф	315/250	0	8	82	0	92
	р	315/250	0	11	80	0	89
АС32	ф	500/400	0	4	88	0	96
	р	500/400	0	5	86	0	95
АС65	ф	400/315	0	4	84	0	96
	р	400/315	0	9	78	0	91
АС50	ф	160/125	0	10	74	0	90
	р	160/125	0	6	70	0	94
АС20	ф	160/125	0	12	70	0	88
	р	160/125	0	16	66	0	84
АС80	ф	315/250	0	10	80	0	90
	р	315/250	0	14	77	0	86
АС100	ф	250/200	0	15	73	0	85
	р	250/200	0	17	71	0	83
АС65	ф	160/125	0	12	75	0	88
	р	160/125	0	18	80	0	82

Приведенная информация касается фактической марки шлифпорошка, фактических (строки ф) и расчетных (строки р) показателей зернистости и зернового состава по массе предельной (P_ϕ), крупной (K_ϕ), основной (O_ϕ) и мелкой (M_ϕ) фракций, а также показателя по

суммарному содержанию основной и промежуточной ($O_{\phi} + Pr_{\phi}$) фракций. Анализ результатов тестирования дает основания сделать следующие выводы. Максимальная погрешность расчетного определения показателей зернового состава по фракциям составляет: по предельной – 0 % (точно); по крупной – до 6 % в сторону завышения (при допуске стандартном абсолютном отклонении результата определения +6 %); по основной – до 10 % в сторону занижения (стандартом допускается –15 %); по мелкой – до 1 % в сторону завышения (стандартом допускается +3 %); по основной и промежуточной – 1÷6 %.

В характере соотношения расчетных и фактических значений показателей зернового состава наблюдается следующая тенденция отклонения: крупная и мелкая – к завышению, основная – к занижению. Такой характер отклонений значительно уменьшает степень риска принять положительное решение относительно стандартности порошка в случаях, когда он таковым не является. Что касается расчетной зернистости, то она во всех случаях совпадала с фактической.

Выводы

1. Впервые получена обобщенная математическая модель процедуры разделения шлифпорошков сверхтвердых материалов ситовым методом. Использование разработанной математической модели позволяет осуществлять моделирование процедуры ситового разделения как для ячеек в форме квадрата, так и в форме ромба с острым углом 2ϕ и в форме окружности.

2. Адекватность допущений, принятых при разработке модели, и правомерность практического использования аналитических зависимостей, связывающих размерные параметры зерна с характерным геометрическим параметром ячейки сита, подтверждается результатами тестирования модели на стандартных шлифпорошках СА в случае сит с ячейками в форме квадрата (частный случай ромба при $\phi = 22,5^\circ$).

Литература

1. Ходаков С. Г. Современные методы измерения дисперсности промышленных порошков // Заводская лаборатория. – 1988. – № 7. – С. 30–38.
2. Ходаков Г. С. Основные методы дисперсного анализа порошков. – М.: Стройиздат, 1968. – 264 с.
3. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Методы как расчетной диагностики зернистости и зернового состава порошков СТМ // Инструментальный світ. – 2006. – № 4 (32). – С. 4–7.
4. Петасюк Г. А. Компьютерное моделирование процедуры ситового анализа шлифпорошков сверхтвердых материалов // Заводская лаборатория. – 1999. – № 10. – С. 29–32.
5. 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.
6. Петасюк Г. А. Опосередкована діагностика висоти зерен шліфпорошків синтетичного алмазу засобами математичного моделювання // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2006. – № 3(97). – С. 131–136.
7. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Введ. 01.01.96. – К.: Держстандарт України, 1995.
8. Никитин Ю. И., Уман С. М., Коберниченко Л. В. и др. Порошки и пасты из синтетических алмазов. – К.: Наук. думка, 1992. – 284 с.
9. Петасюк Г. А., Петасюк О. У. Алгоритм багатоваріантної комп'ютерної побудови та аналізу емпіричних математичних моделей технологічних процесів // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Зб. наук. праць Житомирського державного технологічного університету. – Вип. 1. – 2005. – С. 181–193.

Поступила 16.05.07.