

С.И. Сухонос, Л.Ю. Юрченко, В.Ф. Бердигов,
Б.А. Красюк, О.Г. Семенов

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЦ ИСКУССТВЕННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

(Представлено академиком М.А. Садовским 19.I.1989)

В работе анализируются закономерности мультимодального распределения по размерам частиц искусственного карбида кремния SiC с применением усовершенствованной методики анализа на микроскопе IBAS-2000 в свете открытого недавно явления преимущественных размеров [1,2] (ПР), которое характеризуется постоянством значений мод в распределении минеральных тел по размерам. Пока данное явление не имеет строгого физического объяснения, но накопление экспериментальных данных позволяет обнаруживать интересные феноменологические закономерности.

В исследованиях авторов [3, 4] установлено, что распределение механических и геометрических характеристик частиц SiC в диапазоне размеров от 60 до 1500 мкм носит мультимодальный характер с абсолютным значением мод (по ширине частиц) : 1350, 1000, 465, 270 и 175 мкм и они в первом приближении не зависят от технологических параметров получения SiC. Однако все полученные в этих работах результаты опираются на ситовой анализ с шагом $1,25\times$, который применяется в отечественных исследованиях и производстве абразивных материалов. Применение сит с крупным (грубым) шагом по существу позволяет выявлять не столько преимущественные размеры, сколько преимущественные фракции. Анализ распределения частиц по истинным размерам внутри фракции позволяет лишь приблизительно оценивать абсолютные значения преимущественных размеров из-за того, что зерна одной естественной моды оказываются часто на двух соседних ситах. В работе [4] удалось доказать, что ситовой фактор не может быть ответственным за квазипериодические изменения физических и геометрических свойств частиц, однако исследования по фракциям не могут дать истинных точных рельефов распределения частиц по размерам из-за ряда причин: погрешностей изготовления сит и самого фракционного разделения, различного поведения при просеве частиц разной формы, трудностей точной шивки гистограмм соседних фракций в единый протяженный ряд и т.п. Анализ гистограмм распределений в отдельных фракциях позволил лишь приблизительно судить об истинном рельефе мультимодальности.

Точный рельеф можно выявить при анализе продуктов дробления в широком диапазоне размеров ($L_{\max}/L_{\min} \geq 10$), не разделенных на ситах, а исследуемых в совокупности. Привлечение стандартных методик сервиса IBAS-2000 ничего не дало, так как имеющиеся программы оперируют числом частиц. В широкой же

гамме раздробленного материала число мелких частиц, как правило, во много раз превосходит число наиболее крупных. В результате кривая распределения резко спадает в сторону крупнозернистой части и ее рельеф малоинформативен. Для достижения поставленной цели необходима методика, которая позволила бы одновременно с измерением геометрических характеристик частиц производить их взвешивание. Поскольку крупные частицы тяжелее мелких, весовое распределение имеет гораздо более равномерный по оси размеров характер. Нами разработана методика условного взвешивания.

Для этого в программы IBAS-2000 внесены изменения, согласно которым перед статистической обработкой данных у каждой частицы определяется ее условный объем V' по формуле

$$V' = 1/6 \pi D_s^3,$$

где D_s — диаметр эквивалентной окружности, равной площади истинной площади частицы.

Дальнейшая статистическая обработка проводилась уже не по числу частиц в выбранном диапазоне какого-либо параметра, а по суммарному условному объему. Если принять, что плотность частиц масштабнo-инвариантна, то подобные кривые можно считать условно весовыми, а проводимый анализ моделирует ситовой (со взвешиванием фракций) с любым модулем, что позволяет оперативно анализировать любые разумно большие массивы частиц.

Для определения зависимости ПР от технологии получения в работе исследовали параллельно два материала SiC в диапазоне фракций 200–2000 мкм: синтезированный по традиционной промышленной технологии с последующим стержневым помолом (M) и полученный в экспериментальной печи с улучшенными термодинамическими показателями процесса плавки после дробления свободным ударом (W). Изменения технологии существенно повлияли на геометрические характеристики зерен. Так, если коэффициент формы (отношение ширины частицы d к ее длине D) M -материала равен в среднем 0,65, то для W -материала — 0,59; кроме того, анализ изображений показывает, что у W -частиц поверхность на 30% менее развита, т.е. у них на поверхности меньше выступов и впадин.

По каждому материалу обработано не менее 3000 частиц. Результаты статистической обработки частично представлены на рис. 1, они подтвердили наличие в продуктах дробления SiC инвариантных ПР и выявили ряд новых закономерностей. Во-первых, для параметра d характерны такие же ПР, как и D , а последние мало отличаются от установленных ранее в работах [4, 5]. Во-вторых, все выявленные ПР можно представить двумя как бы сдвинутыми относительно друг друга на коэффициент 1,4 рядами с модулем 2:

Ряд 1 (мкм): [250 ± 30] – 500 ± 25 – 1000 ± 100 – 1950 ± 150 – [4200 ± 200]

Ряд 2 (мкм): [340 ± 20] – 680 ± 40 – 1350 ± 100 – 3100 ± 200 – [6200 ± 250].

Крайние моды здесь взяты в скобки из-за их близости к ситам 200 и 2000, ограничивающим массив частиц и вносящим, видимо, искажения. В-третьих, четко прослеживаются превалирование мод из ряда 1 для M -материала и почти зеркальная закономерность для W -материала. В-четвертых, для d и D (рис. 1) характерно бинарное расщепление моды 1000 мкм. Более детальный анализ гистограмм, как вырезанных из этой области размеров, так и отдельных фракций, показал, что данная мода (рис. 2) действительно имеет выраженный бинарный вид. В отдельных случаях такое расщепление характерно и для других мод.

Использование усовершенствованной методики анализа на IBAS-2000 позволило установить инвариантность преимущественных размеров для SiC, не свя-

занную с ситовым анализом, и впервые выявить тонкие особенности рельефа мультимодальных распределений. Вид рельефа кривой распределения частиц по размерам (рис. 1) помогает по-новому оценить существующие стандарты на сита, которые совершенно не учитывают естественного неравномерного распределения частиц по размерам. Так, неизменный шаг сит $1,25\times$ не вписывается в естественные для SiC ряды с шагом 1,4 и 2,0. Отсюда и наличие постоянного «провала» выхода на одних сетках и избытка на других. Кроме того, если размер ячейки сита меньше ближайшего ПР, мода в распределении фракции может быть сдвинута в крупную сторону и наоборот. Из-за сдвигов мод относительно средней многие фракции имеют би- и даже тримодальный характер [4]. Проведенная проверка истинной модальности фракций, определяемой по отношению их мод для 10 фракций обоих материалов, показывает (рис. 3), что для d отношение колеблется в пределах 1,06–1,5, для D — в пределах 1,0–1,96. Такие перепады модальностей — яркое свидетельство несовпадения искусственной классификации сит с естественным, природным распределением зерен SiC по размерам.

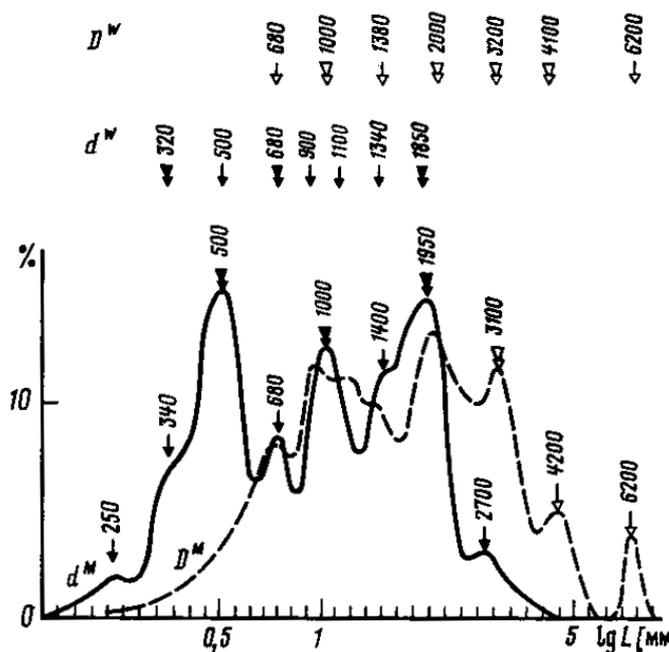


Рис. 1.

Сглаженные гистограммы распределения зерен SiC промышленного производства по минимальному (d^M) и максимальному (D^M) диаметрам в сравнении с основными модами W-материала (вверху). Большими стрелками указаны главные моды гистограммы, малыми — второстепенные

Подведем итоги. Повышенная встречаемость частиц карбида кремния на определенных (преимущественных) размерах обнаружена с применением методики бесситовой классификации и поэтому имеет естественную природу. Изменение условий синтеза SiC и его дробления не меняет значений мод, а приводит лишь к перераспределению их значимости (% выхода) в общем мультимодальном распределении.

Объяснение этого явления, по нашему мнению, можно найти в рамках кластерного подхода [5], если предположить, что кластерно-иерархическая структура вещества обуславливает возникновение потенциальной матрицы устойчивых размеров благодаря универсальности законов образования устойчивых центров симметричных упаковок [6]. Стохастические же изменения условий формирования

структуры тел и разрушения их на отдельные части приводят к доминированию одних типов структуры над другими. Поскольку они связаны с конкретными модами в потенциальной матрице ПР, то вес этих мод в распределении существенно перераспределяется. Но главное, что характеризует инвариантность ПР, — вероятность повышенного выхода тел с промежуточными значениями размеров (не значащимися в потенциальной матрице) всегда остается ниже вероятности появления моды на одном из потенциально устойчивых размеров.

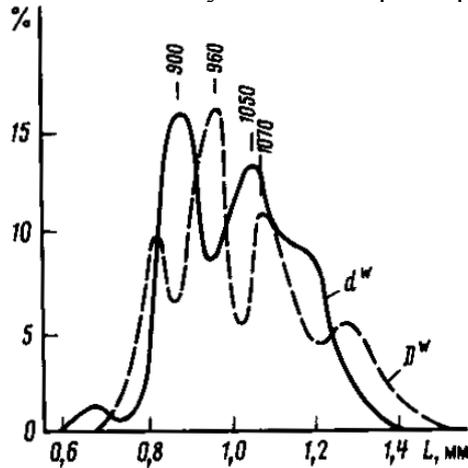


Рис. 2.

Сглаженные гистограммы распределения зерен SiC экспериментального производства фракции 800 мкм по минимальному диаметру (d^w) и фракции 500 мкм по максимальному диаметру D^w

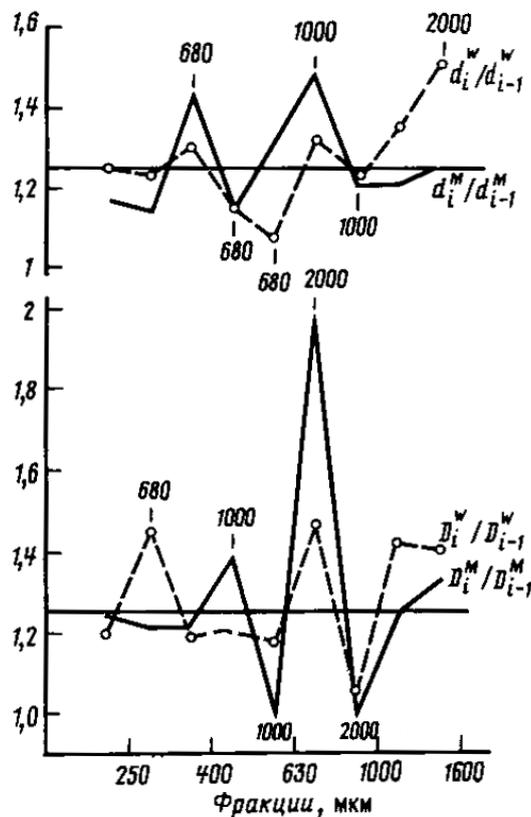


Рис. 3.

Колебания отношений между модами размерных гистограмм соседних фракций SiC; прямые линии — среднеождаемое значение 1,25, которое задается шагом сит

Для SiC в диапазоне 100–6500 мкм предварительно можно выделить два ряда ПР с шагом $2,0\times$, сдвинутых относительно друг друга примерно в 1,4 раза. Наличие инвариантных ПР, не учитываемое в стандартах ситового анализа СССР, значительно отклоняет распределение частиц внутри фракций от одномодального, порождает сдвиги мод, что приводит к резко выраженной 2- и 3-модальности со сравнимой мощностью каждой моды. Неоднородность материала внутри фракций отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках абразивного материала, вносит искажения при анализе свойств порошковых материалов и т.п. Для получения внутри фракции гомогенного вещества требуется разработка стандарта сит с более мелким модулем, чем $1.25\times$ (например, применяемый за рубежом модуль $1.19\times$), который бы учитывал явление преимущественных размеров.

Поступило 17.III.1989

Волжский филиал
Всесоюзного научно-исследовательского института
абразивов и шлифования
Волжский Волгоградской обл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М.А. — ДАН, 1983, т. 269, № 1, с. 69–73.
2. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс, М.: Наука, 1986. 100 с.
3. Юрченко Л.Ю., Бердилов В.Ф., Сухоте С.И. — ДАН, 1987, т. 293, № 3, с. 610–613.
4. Сухонос С.И., Бердилов В.Ф., Красюк Б.А., Семенов О.Г. — ДАН, 199а т. 311, № 1.
5. Петров Ю.И. Кластеры и малые частицы. М.: Наука, 1986.
6. Сухонос С.И., Бердилов В.Ф. Упаковочная модель возникновения устойчивых отделностей. Деп. ВНИИТЭМР. Л., 1986, № 29–86.