

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

## **КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СИММЕТРИИ ФОРМЫ ЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ**

(Представлено академиком М.А. Садовским 13.X.1987)

---

В работе изучается изменение симметрии формы частиц карбида кремния промышленного производства (SiC) с целью выявления физических возможностей повышения качества шлифовальных материалов.

Ранее установлено [1], что такие физико-механические свойства зерен SiC, как статическая и динамическая прочность, а также весовой выход их после дробления, меняются квазипериодично — существуют размеры частиц (ширина  $1000 \pm 50$ ,  $450 \pm 20$ ,  $270 \pm 30$  и  $175 \pm 20$  мкм), на которых увеличивается фракционный выход за счет их большей прочности. Эти размеры оказались в первом приближении инвариантными относительно изменения технологических параметров процесса получения SiC. Подобные же размеры (названные преимущественными) установлены ранее в работе М.А. Садовского [2] как моды мультимодального распределения частиц горных пород. Универсальность установленного явления позволила авторам работы [3] предсказать широкие возможности его использования не только в геологии, но и технике.

Для абразивного производства явление преимущественных размеров может быть использовано, если оно связано с основным фактором, влияющим на качество частиц SiC, — насыпным весом, который, в первую очередь, определяется степенью симметрии их формы.

Стабильное повышение насыпного веса для частиц SiC вполне определенного размера констатировалось в отдельных работах и ранее, но либо не интерпретировалось, либо выглаживалось при аппроксимации, так как причина ошибочно приписывалась несовершенству технической оснащенности анализа. Так, в работе [4] никак не комментировалось повышение насыпного веса для частиц одного из преимущественных размеров (~ 1000 мкм). Более того, фракции 1,25; 0,5; 0,32 и 0,2 мм вообще пропускались в подобных анализах, так как исходно предполагалось, что столь незначительные изменения размеров частиц ( $\times 1,25$ ) не могут привести к существенному изменению геометрических свойств. Однако в работе [5] качественно предсказано, а в [1] экспериментально проверено и подтверждено, что на фракциях 1,25; 0,5 и 0,2 коэффициент формы снижается, а на фракции 0,32 существенно повышается. Все эти вариации симметрии могут получить объяснение в подходе, учитывающем явление преимущественных размеров.

В развитие данного подхода в работах [5,6] предложена упаковочная модель появления устойчивых инвариантных значений преимущественных размеров за

счет существенного действия сил локальной симметрии в процессе формирования структуры хрупких тел. Благодаря этим силам нарушается глобальная симметрия кристаллической решетки и атомы стремятся объединиться в микрокластеры [7], которые, в свою очередь, образуют малые частицы [8], и так далее вплоть до макроуровней. Таким образом, в хрупком теле могут формироваться симметричные ядра всех масштабов, но с определенным дискретным шагом, который, как показывает геометрический анализ, в среднем стремится к 3,15 [5] (среднее эмпирическое значение несколько выше — 3,3 [3]). При дроблении хрупкого тела должно происходить, согласно модели, преимущественное выкрашивание именно этих ядер (рис. 1), размеры которых и определяют преимущественные значения. Осколки ядер заполняют в распределении частиц по размерам промежуточные классы; кроме того, из модели следует, что они не только менее симметричны и прочны, но и имеют большую дисперсию всех геометрических, физико-механических и химических свойств.

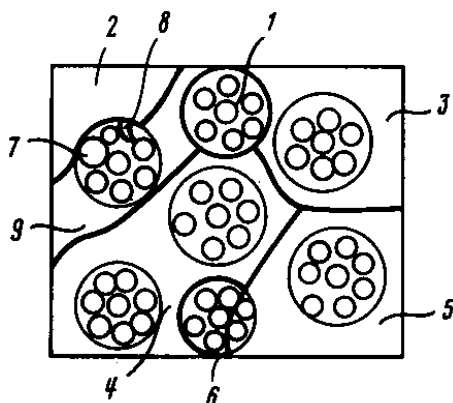


Рис. 1.

Плоская схема кластерной двухуровневой структуры хрупкого тела и возможных вариантов его разрушения: 1, 7 — обнаженные целые ядра; 6, 8 — обнаженные осколки ядер; 3, 4, 5, 9 — различные варианты ядер в оболочках; 2 — осколок оболочки

Проверка этих предположений в части геометрии проведена в работе [1] без использования современных средств автоматизации анализа изображений — частицы проецировали, оконтуривали и измеряли вручную. Это не позволило набрать достаточно разнообразную статистику по геометрии частиц.

В настоящей работе явление преимущественных размеров анализировалось только с геометрических позиций [9] на аппаратуре фирмы «Opton» IBAS-2000 с применением стандартных средств программного обеспечения.

Определяли такие геометрические характеристики частиц, как минимальный  $D_{\min}$  и максимальный  $D_{\max}$  диаметры, периметр  $P_{\text{гг}}$  и фактор эллиптичности  $F_e = a/b$ , от которого во многом зависит симметрия формы частиц. Исследовали 11 фракций (от 0,16 до 1,6 мм с шагом по ГОСТу  $\times 1,25$ ), не менее 200 частиц в каждой фракции, всего более 4000 частиц. В результате установлена достоверная корреляция степени симметрии формы частиц с ранее определенными [1] преимущественными размерами (рис. 2):  $1000 \pm 50$  мкм (фракции 0,3 и 0,63) и  $450 \pm 20$  мкм (фракция 0,32). Данные, полученные для частиц меньших размеров (160–250 мкм), менее надежны, так как для них становятся соизмеримы размеры аппроксимационных точек на экране дисплея при анализе изображения.

Полученные результаты показывают, что фракции зерен с непреимущественными размерами имеют гораздо большую дисперсию по всем четырем параметрам (рис. 2), что подтверждает, скорее всего, предположение об их осколочном харак-

тере. Ядра, имеющие преимущественные размеры, не только имеют меньшую дисперсию геометрических характеристик, но и более высокую среднюю симметрию (рис. 2), причем размах вариации  $F_e$  для значений мод гораздо выше, чем для средних значений  $F_e$ . Это объясняется тем, что в преимущественных фракциях основной однородной группой являются более симметричные ядра, которые и определяют значение моды. В промежуточных фракциях моды задаются группой несимметричных осколков ядер (за исключением фракции 0,4).

Для уточнения деталей распределения частиц по размерам и степени симметрии для всех 11 фракций были построены зависимости  $D_{\min} - F_e$  в трехмерных координатах. Они достаточно хорошо подразделяются на два условных класса по характеру рельефа. В качестве представителей этих классов приведены диаграммы для фракций 0,32 (рис. 3) и 0,4 (рис. 4). Их анализ показывает, что мода  $F_e$  фракции 0,4 принадлежит частицам более крупным, чем у фракции 0,32, и имеет значительно большее относительное значение. Возникновение пика  $F_e$  на значении 0,72 во фракции 0,4 стало возможным, видимо, лишь потому, что эта фракция преимущественно состоит из менее симметричных осколков ядер, значения  $D_{\min}$  и  $F_e$  которых покрывают более широкое поле значений и распределены к тому же гораздо более равномерно на этом поле по сравнению с распределением во фракции 0,32. Необходимо заметить, что пространство значений  $D_{\min} - F_e$  преимущественной фракции 0,32 значительно более дискретно как по размеру, так и по степени симметрии: четко выделяются три «хребта» с резко доминирующим средним ( $420 \pm 40$  мкм), который к тому же разделен на три автономных пика со значениями  $F_e \sim 0,69, \sim 0,73, \sim 0,90$ .

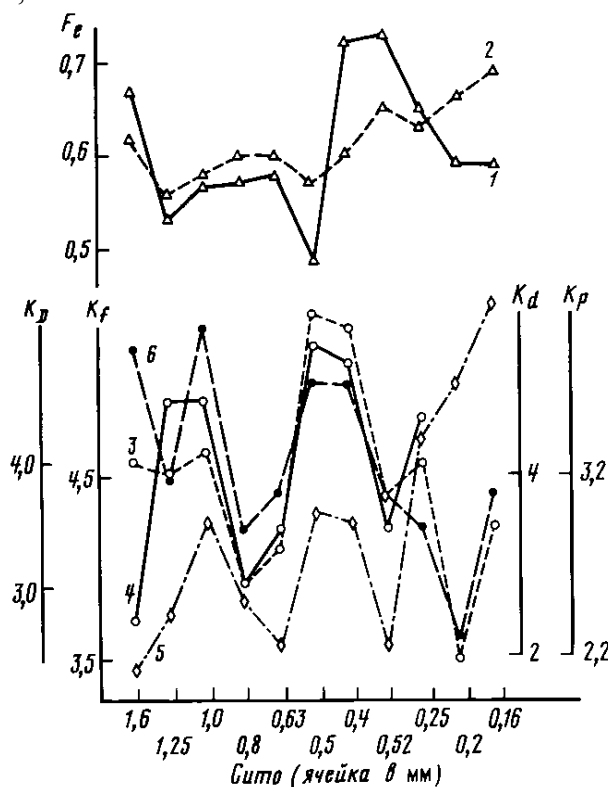


Рис. 2.

Вариации геометрических параметров частиц черного карбида кремния в зависимости от номера зернистости: 1 — значение моды  $F_e$ ; 2 — среднее значение  $F_e$  в каждой фракции; отношение максимального значения параметра к минимальному для соответствующего номера, где 3 — максимальный диаметр  $K_D$ , 4 — фактор эллиптичности  $K_F$ ; 5 — минимальный диаметр  $K_d$  — периметр  $K_p$

Более однородный и плавный рельеф фракции 0,4 (рис. 4) еще раз свидетельствует о большем разнообразии значений размеров частиц-осколков и внутри интервала. Подобное же различие в целом сохраняется для других преимущественных и не преимущественных фракций.

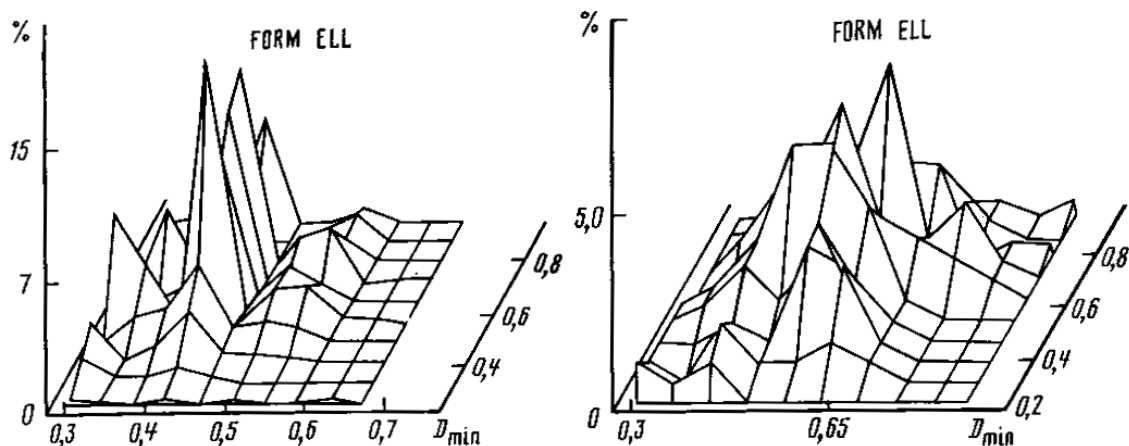


Рис. 3.

Распределение частиц фракции 0,32 мм в зависимости от их минимального диаметра  $D_{\min}$  и фактора эллиптичности  $F_e$

Рис. 4.

Распределение частиц фракции 0,4 мм в зависимости от их минимального диаметра  $D_{\min}$  и фактора эллиптичности  $F_e$

Таким образом, в результате проведенных исследований геометрических параметров частиц карбида кремния, не зависящих от погрешностей ситового анализа, установлено наличие квазипериодического повышения симметрии частиц на определенных характерных размерах, в частности на 1000 и 450 мкм, названных преимущественными [2] или устойчивыми [10]. Частицы преимущественных фракций имеют не только более высокую симметрию, но и меньшую дисперсию геометрических параметров. Внутри фракций они более существенно группируются в параметрически автономные группы. Возможное объяснение этим закономерностям дано в модели масштабно-инвариантной кластерной структуры хрупкого тела, которая позволила их предсказать теоретически [5,6].

Опираясь на эту модель, можно предсказать следующие основные направления повышения качества карбида кремния черного промышленного производства. Учитывая, что основной показатель качества частиц SiC — насыпной вес — существенно зависит от их симметрии, а последняя существенно связана со степенью проявления преимущественности, которой можно управлять, включая для этого различные факторы, усиливающие кластерообразование, можно предложить следующее. На этапе приготовления шихты необходимо вводить различные кластерообразующие добавки, осуществлять отбор соответствующих узких фракций и их композиций; на этапе синтеза SiC, в соответствии с кластерной моделью, подбирать благоприятствующие кластерообразованию термодинамические параметры и структурированное магнитное поле; на этапе дробления куска SiC применять многоступенчатую технологию со строго заданной энергетикой разрушения, позволяющей выкрашивать в основном целые ядра; на этапе отсева подбирать шаг сит с учетом естественных границ между размерными классами зерен SiC; на этапе изготовления абразивного инструмента подбирать рецептуры с учетом масштаб-

ных вариаций площади поверхности абразивных зерен; на этапе использования абразивного инструмента учитывать естественное различие физико-механических свойств преимущественных и непреимущественных зернистостей для выбора соответствующих оптимальных режимов их эксплуатации.

Можно предположить, что явление преимущественных размеров имеет связь с эксплуатационными показателями не только для SiC, но и других абразивных, а также неабразивных зернистых материалов, что ставит задачу широкого изучения как теоретических, так и технологических аспектов этой проблемы.

Поступило 25 XII 1987

Волжский филиал  
Всесоюзного научно-исследовательского института  
абразивов и шлифования, г. Волжский

Московский авиационный институт им. Серго Орджоникидзе

---

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Юрченко Л.Ю., Бердигов В.Ф., Сухонос С.И. — ДАН, 1987, т. 293, № 3, с. 610–613.
2. Садовский М.А. — ДАН, 1983, т. 269, № 1, с. 69–73.
3. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и тектонический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
4. Вишняков В.А., Поспелов И.Н., Кравцова И.Б. В сб.: Новые методы абразивной обработки. Киев: ИПМ АН УССР, 1975, с. 92–95.
5. Сухонос С.И., Бердигов В.Ф. Упаковочная модель возникновения устойчивых отдельных. Л., 1986, с. 2–38. Деп. ВНИИТЭМР, 1986, № 29–86.
6. Сухонос С.И. Разноразмерное моделирование устойчивых структур микрокластеров. Л., 1986, с. 2–28. Деп. ВНИИТЭМР, 1986, № 52–86.
7. Microclusters. Proc. of the INEC Symposium, Japan, October 20–23, 1986, V., 1987.
8. Петров Ю.М. Кластеры и малые частицы. М.: Наука, 1986. 456 с.
9. Meloy T.P., Clarec N. A critical comparison of partical shape analysis techniques. Paiticulate and multiphase processes. В.: Springer-Verlag, 1987, vol. 1, p. 437–445.
10. Сухонос С.И. В сб.: Проблемы анализа биологических систем. М.: Изд-во МГУ, 1983, с. 90–112.