

части трубы, если ее длина  $r_0 > r'_0$ . Установлена (при  $5 \leq \beta \leq 45^\circ$ ) слабая зависимость максимальной степени пересжатия от угла конического сужения.

Поступила в редакцию 19/V 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Айвазов, Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1947, 17, 10.
2. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
3. Т. П. Гавриленко, Ю. А. Николаев, М. Е. Толчийн. ФГВ, 1979, 15, 5.
4. Т. П. Гавриленко, Е. С. Прохоров. ФГВ, 1981, 17, 6.
5. Т. П. Гавриленко, Е. С. Прохоров. Матер. VI Всесоюз. симп. по горению и взрыву. Черногловка, 1980.
6. С. А. Ждан, В. И. Феденок. ФГВ, 1982, 18, 6.
7. Т. В. Баженова, Л. Г. Гвоздева. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977.
8. И. П. Гинзбург. Прикладная гидрогазодинамика. Л.: Изд-во ЛГУ, 1958.
9. Ю. А. Николаев, П. А. Фомин. ФГВ, 1982, 18, 1.
10. Ю. А. Николаев, М. Е. Толчийн. ФГВ, 1977, 13, 3.
11. С. К. Годунов, А. В. Забродин и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
12. Г. А. Алашкин, С. К. Годунов и др. Решение одномерных задач газовой динамики в подвижных сетках. М.: Наука, 1970.

### УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ АЛМАЗНЫЕ ПОРОШКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА

А. М. Ставер, Н. В. Губарева, А. И. Лямкин, Е. А. Петров  
(Новосибирск)

Энергия взрыва широко используется для осуществления фазовых переходов в веществах. Работа [1] — одна из первых, в которой описаны техника взрывного синтеза и некоторые свойства алмазов. В [1] ромбоэдрический графит подвергали ударно-волновому нагружению при 300 кбар. В [2, 3] алмазы получены путем ударно-волновой обработки смесей графита с металлами при 200—400 кбар и длительности ударной волны 10—20 мкс [4]. В [4] установлено, что алмазный порошок содержит одиночные кристаллы размером не более 0,05 мкм, скопления и плотно спаянные агрегаты размерами до 5 мкм и более, состоящие из кристаллов размерами 10—40 и 100—1600 Å. Подобным методом алмазы синтезированы в [5]. В [6, 7] приведены данные о свойствах алмазов, полученных динамическими способами, и изучены физико-химические свойства алмазов, синтезированных при воздействии на графит высоких давлений и температур, создаваемых детонацией ВВ. Установлено, что алмаз (смесь кубической и гексагональной модификации) характеризуется высокой дисперсностью. Некоторые свойства алмазных порошков, образующихся при экстремальных условиях охлаждения, описаны в [8]. На рис. 1 приведена фазовая диаграмма состояния углерода в  $p - T$ -ко-

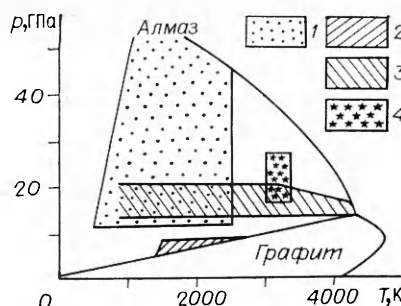


Рис. 1.  $p - T$ -диаграмма состояния углерода с указанием областей синтеза различными методами.

1 — ударно-волновой синтез; 2 — статический переход с использованием катализатора; 3 — статический переход без катализатора; 4 — область синтеза, осуществленного авторами.

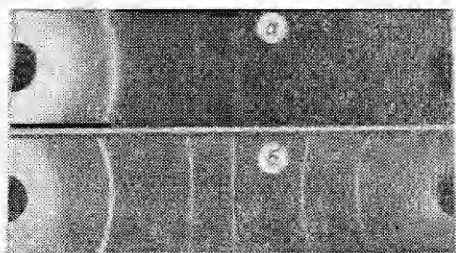
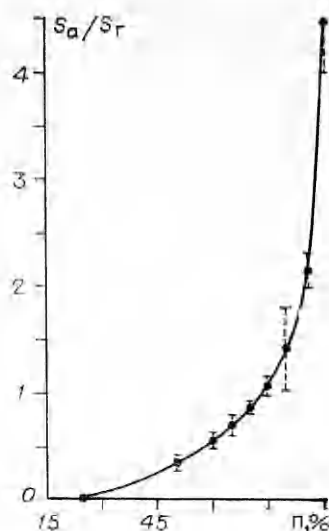


Рис. 2. Рентгенограммы алмазов, синтезированных в динамических (а) и статических условиях (б). Использовалось  $\text{Cu K}\alpha$ -излучение.

Рис. 3. Калибровочная кривая для определения содержания алмаза в порошке.



ординатах [9]. Видно, что современные достижения физики высоких давлений позволяют исследовать возможность синтеза алмазов практически в любой области диаграммы состояния.

В данной работе исследованы некоторые свойства ультрадисперсных алмазных порошков, полученных при давлениях и температурах, указанных на диаграмме состояния (см. рис. 1, область 4). Особое внимание уделялось изучению фазового состава порошков и исследованию размеров алмазных частиц. Определение размеров алмазных частиц важно для установления областей их использования, а также в сочетании с другими экспериментальными данными необходимо для определения скорости роста кристаллов.

Исследовались свойства порошков после кипячения продуктов синтеза в хлорной кислоте в течение двух часов и многократной промывки в воде с последующей сушкой. В продуктах синтеза нерастворимого в кислотах остатка было 40—50%. На рис. 2, а приведена дебаграмма синтезированного алмаза: видны линии (111), (220) и (311). Для сравнения на рис. 2, б показана рентгенограмма алмаза марки АСМ 5/3; 3/2, синтезированного в статических условиях.

Для определения процентного содержания алмаза в полученных после обогащения порошках построен график, представляющий собой зависимость отношений интегральных интенсивностей рентгеновских дифракционных линий (111) алмаза и линий (002) графита от содержания алмаза в смеси алмаз — графит (рис. 3). Для построения калибровочной кривой использовали спектрально чистый графит и алмазный порошок АСМ 5/3; 3/2.

Содержание алмазной фракции определяли следующим образом. К навеске хорошо растертого исследуемого порошка добавляли известное количество спектрально чистого графита и готовили образец для рентгеноструктурного анализа. С помощью дифрактометра ДРОН-1 записывали профили дифракционных линий, измеряли площади под ними и подсчитывали их отношение. Содержание алмаза в исследуемом порошке рассчитывали по формуле

$$P_a = \frac{P P_n}{P},$$

где  $P_a$  — содержание алмаза в исследуемом порошке, %;  $P$  — вес исследуемого порошка;  $P_n$  — масса навески (исследуемый порошок + графит);  $P$  — содержание алмаза в навеске, определенное по графику, %.

Определенное таким образом содержание алмазной фракции в порошках, на дебаграммах которых нет посторонних линий, колеблется от ~80 до ~90%. Спектральный анализ показал наличие в порошках

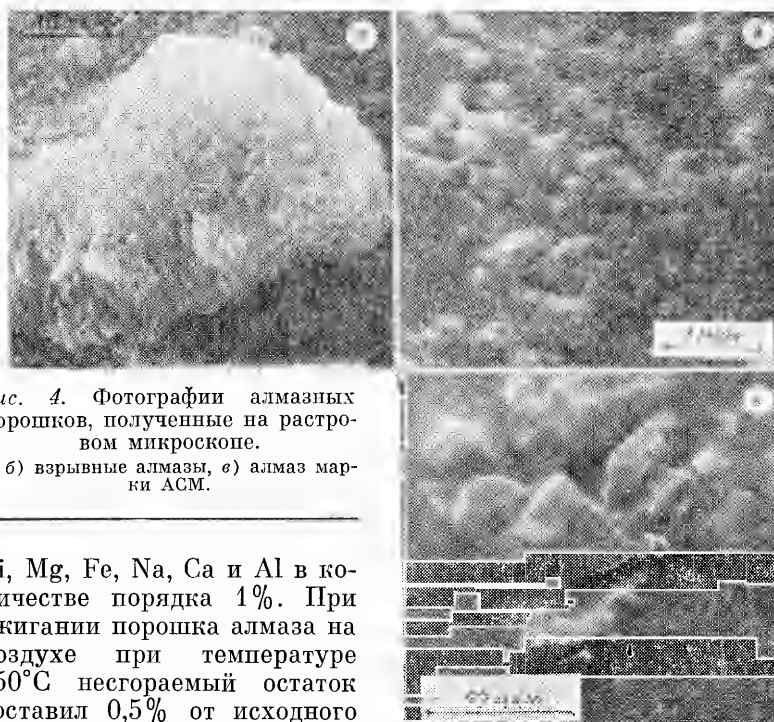


Рис. 4. Фотографии алмазных порошков, полученные на растровом микроскопе.  
а, б) взрывные алмазы, в) алмаз марки АСМ.

Si, Mg, Fe, Na, Ca и Al в количестве порядка 1%. При сжигании порошка алмаза на воздухе при температуре 950°C несгораемый остаток составил 0,5% от исходного веса. Рентгеноструктурным анализом установлено, что несгораемый остаток содержит  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$  и  $Fe_3C$ . Определение зернового состава алмазного порошка обычно проводится на оптическом микроскопе. Результаты таких измерений приведены ниже.

Размер зерен, мкм	5—3	3—2	2—1	<1
Содержание в смеси, %	1	8	39	52

Для более тонких исследований поверхности частиц, их формы и размеров использовали растровый микроскоп JSM-35 и электронный микроскоп JEM-100СХ. Для электронно-микроскопических исследований применяли тщательно очищенные порошки, на дебаграммах которых нет посторонних линий.

На рис. 4, а, б показаны фотографии частиц, полученные на растровом микроскопе. Для сравнения на рис. 4, в приведена фотография алмазного порошка марки АСМ, синтезированного в статических условиях. Исследования, проведенные на растровом микроскопе, позволяют сделать вывод о том, что видимые в оптическом микроскопе отдельные зерна представляют собой скопления частиц. Размеры отдельных частиц взрывных алмазов, определенные на этой стадии исследований, не превышают 0,15 мкм. Поскольку разрешающая способность сканирующего микроскопа составляет  $\sim 200 \text{ \AA}$ , то не исключено, что, видимые, как отдельные, частицы являются конгломератами. В пользу этого предположе-

НКЛ	Порошок	В, град	$10^{-3} \beta$ , рад	$\beta_2/\beta_1$	$D, \text{ \AA}$	$\Delta a/a$
$\Theta_1 (111)$	АУ	2,74	46,0	1,6	40	—
	АСМ	0,22	1,1	2,1	2500	$0,1 \cdot 10^{-3}$
	Эталон	0,16	—	—	—	—
$\Theta_2 (311)$	АУ	4,58	77,0	—	—	—
	АСМ	0,40	12,3	—	—	—
	Эталон	0,24	—	—	—	—



Рис. 5. Фотография алмазных частиц, полученная на электронном микроскопе (а) и электрограмма (б).

ния говорят отсутствие правильной огранки и рыхлая поверхность частиц.

Для исследований в просвечивающем электронном микроскопе порошок тщательно растирали в спирте и наносили на углеродную реплику, лежащую на объектной сеточке. Удалось получить изображение отдельных частиц порошка (рис. 5, а). На фотографии видно, что частицы как в скоплениях, так и отдельно расположенные мелкие. На рис. 5, б приведена электрограмма, полученная от этих частиц. Дифракция электронов во всех изученных случаях дает кольцевую картину. Известно, что верхний предел размера кристаллических частиц, дающих кольцевую картину на электрограмме, составляет  $10^3$ — $10^2$  Å [10]. Следовательно, в нашем случае можно говорить о том, что размеры исследуемых частиц всегда меньше этой величины. Измерения размеров частиц по электронно-микроскопическим снимкам дают значения в пределах 30—120 Å.

С целью изучения субструктуры микропорошков проведен анализ физического уширения рентгеновских дифракционных линий. С помощью дифрактометра записывали линии (111) и (311) алмаза в  $CoK\alpha$ -излучении. За эталонные приняты линии порошка природного алмаза, имеющие хорошее расщепление  $K\alpha$ -дуплета как на задних, так и на передних линиях.

Расчет физического уширения проводили по методу аппроксимации [11]. Чтобы избежать ошибок, связанных с неравноосностью блоков, рекомендуют использовать линии, принадлежащие одной отражающей плоскости в разных порядках отражения. Однако для кристаллов кубической модификации это требование не обязательно [12]. Учитывая это, сняты линии (311), так как более дальние линии настолько малоинтенсивны, что записать их даже по точкам невозможно. Результаты измерений приведены в таблице, где видно, что ширина рентгеновских дифракционных линий  $B$  синтезированного ультрадисперсного алмаза (АУ) на порядок больше, чем у синтезированного в статических условиях (АСМ). Причем уширение  $\beta$  обусловлено в основном дисперсностью блоков мозаики ( $\text{tg } \Theta_2/\text{tg } \Theta_1 = 3,13$ ;  $\cos \Theta_1/\cos \Theta_2 = 1,63$ ). Это свидетельствует о том, что области когерентного рассеяния  $D$  измельчены до величин, меньших 0,1 мкм. Размер областей когерентного рассеяния синтезированного алмаза составляет  $\sim 40$  Å. По-видимому, в данном случае эта величина представляет собой средний размер частиц.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что средний размер частиц синтезированного в наших условиях алмаза составляет  $\sim 40$  Å. Необходимы дальнейшие исследования для определения прочности конгломератов частиц.

Поступила в редакцию 1/1 1983

## ЛИТЕРАТУРА

1. P. S. De Carli, J. C. Jamieson. Science, 1961, 133, 3467.
2. L. F. Trueb. J. Appl. Phys., 1968, 39, 10.
3. L. F. Trueb. J. Appl. Phys., 1971, 42, 2.
4. J. R. Cowan, B. W. Dunnington, A. H. Holzman. U S Patent 3.401.019, 1968.
5. А. М. Ставер, А. А. Дерibas. ФГВ, 1977, 13, 3.
6. Г. А. Ададунов, О. Н. Бреусов и др. Тез. II Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. М., 1976.
7. Г. А. Ададунов, А. В. Балувев и др. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, 1977, 13, 4, 649.
8. В. И. Трефилов, Г. И. Саввакин и др. Докл. АН СССР, 1978, 239, 4.
9. D. J. Morris. J. Appl. Phys., 1980, 51, 4.
10. К. Эндрюс, Д. Дайсон, С. Киоун. Электронограммы и их интерпретация. М.: Мир, 1971.
11. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970.
12. В. Е. Батурич, Ю. Д. Клебанов. Порошковая металлургия, 1975, 1.

## ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВВ ПРИ ВЗРЫВАХ В ГРУНТАХ

Б. И. Вайнштейн, В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич  
(Москва)

Эффективность взрывов в грунтах наиболее полно можно характеризовать зависимостями параметров воронки выброса от глубины заложения заряда и полями массовых скоростей, т. е. распределениями во времени и по пространству массовых скоростей грунта. Поля массовых скоростей дают возможность определить смещения, деформации, кинетическую энергию грунта, а также оценить плотность грунта и размеры котловой полости.

Относительную эффективность источников при взрывах в грунтах удобно оценивать с помощью тэнового эквивалента  $\eta$  (коэффициент, на который необходимо умножить энергию рассматриваемого источника, чтобы зависимости, характеризующие действие взрыва данного источника в грунте, совпали с полученными при взрывах зарядов тэна в том же грунте). Например, распределение массовых скоростей во времени и по пространству при взрыве рассматриваемого источника имеет вид

$$u = f(R/C^{1/3}, t/C^{1/3})_{\text{тэн}} = f[R/(\eta C)^{1/3}, t/(\eta C)^{1/3}]_{\text{ист.}}$$

Понятно, что  $\eta$  имеет смысл при условии, что характер закономерностей, описывающих механическое действие рассматриваемого источника и взрыва зарядов тэна, отличается незначительно.

При взрывах в насыпных порошкообразных средах, как показали эксперименты [1], относительная эффективность источников при равной энергии взрыва определяется температурой продуктов. В частности, при постоянных энергии взрыва и концентрации энергии повышение температуры продуктов вызывает снижение эффективности взрыва.

В случаях, когда можно пренебречь испарением или разложением среды в очаге взрыва на ранних стадиях расширения полости, в насыпных средах  $\eta$  равен отношению начальной температуры продуктов детонации тэна к начальной температуре продуктов рассматриваемого источника, т. е.

$$\eta = T_{0 \text{ тэн}}/T_0$$

или приближенно

$$\eta = 9,5(n_0/\Delta E_0)^{0,6}, \quad (1)$$

где  $n_0$  — количество газообразных продуктов взрыва, моль/г;  $\Delta E_0$  — энергия взрыва, ккал/г.

Зависимость тэнового эквивалента взрыва от количества газообразных продуктов на единицу энергии (или от начальной температуры про-