

УДК 669.0

Губенко С.И., д-р техн. наук, профессор,  
*Национальная металлургическая академия, г Днепр, Украина*,  
Скобенко А.В., канд. техн. наук, доцент, декан факультета строительства  
Назаровец В.В., студент группы 184м-19-1 ФБ,  
*Национальный технический университет «Днепровская политехника»,  
г. Днепр, Украина*

### АЛМАЗЫ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В ЧУГУНЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫМ СПОСОБОМ

В области синтеза алмаза одной из наиболее актуальных проблем является создание неэнергоёмких способов выращивания монокристаллов с заданными физико-техническими, химическими, функциональными и другими характеристиками. К одной из задач, представляющих фундаментальный интерес, относятся исследования закономерностей фазовых переходов и структурных превращений, протекающих в твердой ростовой среде на примерах чугунов как модельных сплавов, содержащих различные источники углерода.

В работе использовали, серые чугуны с пластинчатым и шаровидным графитом. Химический состав основных элементов в чугуне приведен в табл. 1. Чугунные образцы цилиндрической формы (диаметр 30 мм, высота 9 мм) помещали в обойму из стали 40.

Таблица 1

Химический состав исследуемых чугунов

№	Марка чугуна	Содержание элементов, %					
		C	Mn	Si	S	P	Ni
1	Феррит + графит пластинчатый	3,75	0,22	4	0,04	0,04	0,23
2	Аустенит + графит пластинчатый	4	1,18	-	0,03	0,05	12,2
3	Аустенит + графит шаровидный	4	1,18	0,4	0,03	0,02	12,7

Ударное сжатие осуществлялось металлической пластиной, разогнанной продуктами детонации взрывчатого вещества в соответствии с методиками, приведенными в [1-3], что позволяло достичь максимальное значение давления в образцах чугуна за счет максимальной скорости разгона пластины. Плоская детонационная волна в заряде взрывчатого вещества формировалась с помощью лазерного инициирования слоя светочувствительного взрывчатого состава, нанесенного на верхнее основание заряда ВВ [4-11]. Заряды взрывчатых веществ изготавливались из сплава TNT / RDX 40, скорость

детонации которого составила около 7800 м/с. Формирование плоской детонационной волны в заряде взрывчатого вещества осуществлялось взрывом инициирующего слоя светочувствительного взрывчатого композита ВС-2. Разгон металлической пластины-ударника осуществляется плоским фронтом детонации, сформированным в заряде взрывчатого вещества. В качестве источника излучения использовался твердотельный оптический квантовый генератор на неодимовом стекле, работающий в режиме генерации добротности резонатора. Длительность лазерного импульса 30 нс, энергия в импульсе 100 мДж, длина волны излучения 1,06 мкм. На пути лазерного луча установленная рассеивающая линза расширяла лазерный луч таким образом, что его диаметр на поверхности ВС-2 составлял 45 мм. Образцы чугуна представляли собой цилиндры высотой 5 мм, диаметром 30 мм, размещаемые в стальной обойме. Расчетные значения температуры нагревания железной матрицы ( $T_m$ ) и включений графита ( $T_g$ ) в диапазоне от 50 ГПа до 90 ГПа составляет: при давлении 50 ГПа  $T_m = 400$  К,  $T_g = 770$  К; при 90 ГПа –  $T_m = 720$  К,  $T_g = 1420$  К. При среднем давлении удара около 75 ГПа, скорость деформации  $100 \text{ с}^{-1}$ , время действия давления  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  с. Некоторые образцы подвергали ковке при температуре  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью деформации  $10 - 30 \text{ с}^{-1}$ , степень деформации составляла 50%. Образцы после обработок давлением подвергали термоциклированию со скоростью нагрева  $150^\circ \text{ C/мин}$  до  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , выдержка  $20 \dots 30$  мин, охлаждение с печью (5 циклов).

Проводился химический, микроструктурный, спектральный, рентгенофазовый анализы чугунов. Исследовались, в частности, особенности распределения химических элементов в фазах чугуна, плотность дислокаций, параметры кристаллической решетки и др. После взрывной обработки чугунов в графитных включениях обнаружены поликристаллические алмазы, состоящие из множества наноразмерных монокристаллов алмаза (рис. 1, а, б). Установленные физические особенности фазовых превращений части графитных включений в алмаз не отличаются от установленных в одной из первых работ (Trueb L.F., 1968), опубликованных в данной области исследований.

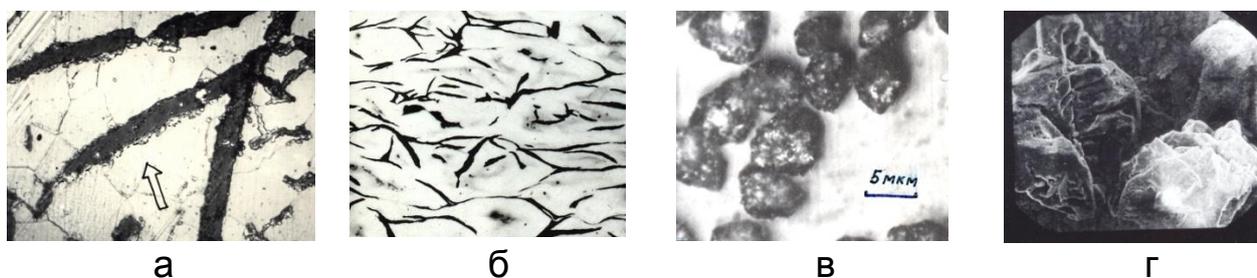


Рис. 1. Алмазы в структуре чугуна после обработки взрывом – а ( $\times 200 \times 4$ ), в; ковка+ взрыв – б ( $\times 500$ ), г ( $\times 125 \times 4$ )

Полагаем, что превращение графита в алмаз при давлениях ударного сжатия, превышающих 50-70 ГПа, осуществляется через так называемое «переходное состояние», характерное для вещества, не имеющего дальнего порядка в расположении атомов углерода [12], что впервые было доказано экспериментально [13].

Алмазы образуются не во всех графитных включениях. В случае пластинчатого графита алмазы возникают преимущественно во включениях, ориентированных перпендикулярно к направлению распространения фронта ударной волны. Следовательно, чтобы повысить выход алмаза, необходимо ориентировать графит в определенном направлении. Перед взрывной обработкой осуществляли ковку чугуновых образцов, в результате которой включения графита ориентировались перпендикулярно направлению удара кузнечного молота.

Установлено, что после пластической деформации возрастает доля ромбоэдрического графита. Если в исходном состоянии она составляла 6-7,5% в зависимости от вида чугуна, то послековки возросла до 50...60%. Размер алмазных поликристаллических частиц, образующихся в результате взрывной обработки, составлял от 1 до 3 мкм (основная фракция), встречались частицы размером ~ 10 мкм. Наибольшие (до 200 мкм) частицы наблюдались в чугунах, предварительно подвергнутых ковке.

Как известно, для алмазных включений характерно наличие малых блоков мозаики (~140 А) и высокой плотности дислокаций (~ $10^{12}$  см<sup>-2</sup>). Это совпадает с результатами настоящих исследований по определению плотности дислокаций в чугуновых образцах после взрыва. Алмазные частицы представляют собой поликристаллические агрегаты с высокоразвитой (несингулярной) поверхностью (рис. 1, в, г).

Поликристаллы характеризуются высокоразвитой поверхностью, потенциально способной к дальнейшему росту в кинетическом режиме при термоциклическом воздействии на микроструктуру чугунов [1, 14-16]. .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соболев В.В., Таран Ю.Н., Губенко С.И. (1993) Синтез алмаза в чугуне. *Металловедение и термическая обработка металлов*, №1, 3-6.
2. Sobolev, V.V., Taran, Y.N., Gubenko, S.I. (1997) Shock wave use for diamond synthesis. *Journal De Physique. IV: JP Volume 7, Issue 3, Pages C3-73 – C3-75.*
3. Sobolev, V.V., Taran, Yu.N., Gubenko, S.I. (1993) Synthesis of diamond in cast iron. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. Issue 1, January 1993, Pages 2-6.
4. OPSIN – A new system of blasthole and deep-hole charges blasting in explosives / V.V. Sobolev, A.V. Chernay, N.M. Studinsky // 5th – International

Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Sao Paulo, Brazil, 22-25 October 1996. – Sao Paulo, 1996. – P. 441-443.

5. Sobolev V., Shiman L.N., Nalisko N.N. Kirichenko A.L. (2017) Computational modeling in research of ignition mechanism of explosives by laser radiation // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, – 2017, – №6. – P. 53-60.

6. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Chernaj, V.A., Ilyushin, M.A., Dlugashek, A. (2003) Laser initiation of charges on the basis of di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazol)-copper (II) perchlorate // *Fizika Goreniya i Vzryva*. Volume 39, Issue 3, 2003, Pages 105-110.

7. Chernai A.V., Sobolev V.V., Ilyushin M.A., Zhitnev N.E., Petrova N.A. (1996) On the mechanism of ignition of energetic materials by a laser pulse // *Chemical Physics Reports* Volume 15, Issue 3, 1996, Pages 457-462.

8. Chernaj, A.V., Sobolev, V.V., Ilyushin, M.A., Zhitnik, N.E. (1994) The method of obtaining mechanical loading pulses based on a laser initiation of explosion of explosive coatings // *Fizika Goreniya i Vzryva* Volume 30, Issue 2, , Pages 106-111.

9. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Ilyushin, M.A., Zhitnik, N.E. (1994) Generating mechanical pulses by the laser blasting of explosive coating // *Combustion, Explosion, and Shock Waves* Volume 30, Issue 2, Pages 239-242.

10. Термоелектрическа обработка минералов и горных пород / О.В. Орлинская, В.В. Соколов, А.В. Черная. — Днепропетровск: НГА Украины, 1999. – 93 с.

11. Фізика гірських порід / В.В. Соколов, О.В. Скобенко, С.Я. Іванчишин. – Дніпропетровськ: Поліграфіст, 2003. – 255 с.

12. Соколов В.В., Слободской В.Я., Егоров П.А. (1989) Возможный механизм спонтанной кристаллизации алмаза при ударном сжатии углеродсодержащих сплавов. Детонация. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Черногловка: ОИХФ, 69-72.

13. D. Kraus, A. Ravasio, M. Gauthier, D.O. Gericke, (2019) Nanosecond formation of diamond and lonsdaleite by shock compression of graphite. *Nat. Commun.* 7:1970.

14. Sobolev V.V. Diamond crystallization in nature // *Combustion, Explosion, and Shock Waves* Volume 23, Issue 1, January 1987, Pages 83-86.

15. Slobodskoi, V.Ya., Sobolev, V.V., Baranov, P.N. Diamond crystallization mechanisms // *Combustion, Explosion, and Shock Waves* Volume 26, Issue 3, May 1990, Pages 362-365.

16. Sobolev, V.V., Taran, Yu.N., Gubenko, S.I. Synthesis of diamond in cast iron // *Metal Science and Heat Treatment*. Volume 35, Issue 1, January 1993, Pages 3-9.