



8. Блинков Ю. А., Мозжилкин В. В. Генерация разностных схем для уравнения Бюргера построением базисов Грёбнера // Программирование. 2006. Т. 32, № 2. С. 71–74.
9. Gerdt V. P., Blinkov Yu. A., Mozhilkin V. V. Gröbner bases and generation of difference schemes for partial differential equations // Symmetry, Integrability and Geometry : Methods and Applications. 2006. Vol. 2. P. 26. URL: <http://www.emis.de/journals/SIGMA/2006/Paper051/index.html> (дата обращения: 12.02.2010).
10. Gerdt V. P., Blinkov Yu. A. Involution and difference schemes for the Navier-Stokes equations // Computer Algebra in Scientific Computing / Lecture Notes in Computer Science. Berlin : Springer-verlag, 2009. Vol. 5743. P. 94–105.

УДК 546.26

## ШАРОВИДНЫЙ ГРАФИТ – УНИКАЛЬНОЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ УГЛЕРОДА

А. А. Аникин, С. Б. Вениг, Д. И. Биленко, А. Н. Грибов

Саратовский государственный университет  
E-mail: gribovan@mail.ru

Шаровидный графит – малоизученная форма графита. Известно, что его присутствие влияет на придание серым чугунам свойств сталей. Проведенными исследованиями установлено, что шаровидный графит является уникальной слоисто-спиральной системой микро- и нанобразований, неоднородной по фазовому составу, структуре и элементному составу с преимущественно периодическим чередованием близких слоёв. Такие системы могут обладать свойствами и их сочетаниями, существенно иными, нежели отдельные микро- и наночастицы и композиты на их основе. Высокое отношение площади поверхности к объёму в таких частицах, варьируемая насыщенность связей и переменная топология указывают на перспективность изучения физических, адсорбционных и каталитических свойств и создания ряда устройств на их основе.

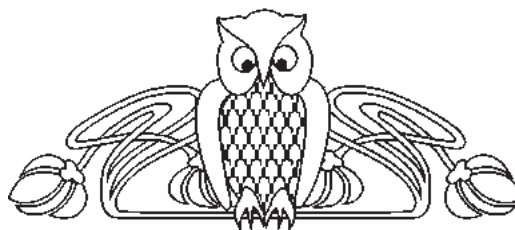
**Ключевые слова:** углерод, графит, шаровидный графит, высокопрочный чугун, контейнер, свойства, состав, морфология, строение.

### Spheroidal Graphite – Unique Morphological Formation of Carbon

А. А. Anikin, S. B. Wenig, D. I. Bilenko, A. N. Gribov

Spheroidal graphite is little-known form of graphite. It is known that its presence affects the properties of gray cast iron post, typical steels. Research evidence that the spheroidal graphite is a unique layered spiral system of micro-and nanostructures, the inhomogeneous phase composition, structure and elemental composition with predominantly periodic alternation of closely spaced layers. Such systems can have properties and their combinations significantly different than the individual micro-and nanoparticles and composites based on them. The high ratio of surface area to volume ratio in these particles, varied richness of relationships and the topology of the variable point to their promise to study their physical adsorption and catalytic properties and a number of devices based on them.

**Key words:** carbon, graphite, spheroidal graphite, ductile iron, container, properties, composition, morphology, structure.



Разнообразие свойств, которые присущи углероду и его соединениям, исключительно велико. Углерод и содержащие его материалы встречаются в бесчисленных процессах живой и неживой природы и служат объектами непрекращающихся фундаментальных исследований [1]. Однако до настоящего времени в исследовании морфологических образований углерода и их влияния на различные процессы, и тем более на управление этими процессами, остается много белых пятен. К таким белым пятнам следует отнести графит шаровидной формы (ШГ). Данных о наличии ШГ в природе в литературе нами не обнаружено. Графит шаровидной формы чаще всего связывают с получением высокопрочных чугунов с такой формой графита при модифицировании их магнием, церием, иттрием, лантаном, неодимом, празеодимом и лигатурами на их основе. Введение в расплав серого чугуна, имеющего низкие физико-механические свойства, сотых долей процента модификаторов превращает последний в высококачественную сталь со специальными физико-механическими свойствами (износостойкость, коррозионная стойкость, жаростойкость и др.). Например, на рис. 1 представлено изменение механических свойств ферритного чугуна в зависимости от количества введенного модификатора – иттрия – при вторичном модифицировании ферросилицием марки ФС 75.

При этом форма включений углерода в чугуне превращается из пластинчатой в шаровидную (рис. 2) [2].

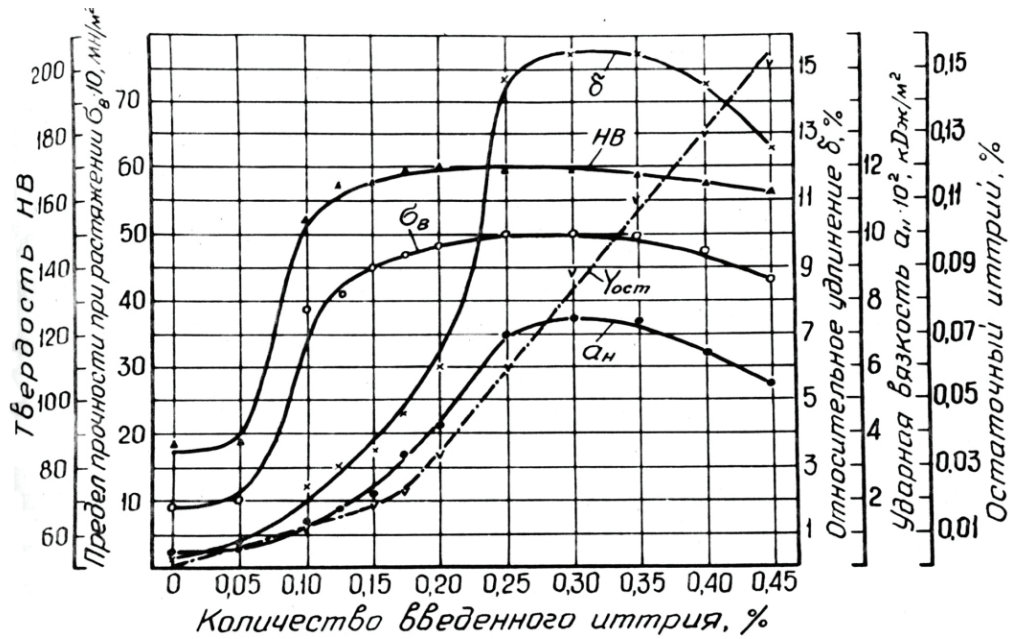


Рис. 1. Изменение механических свойств ферритного чугуна в зависимости от количества введенного иттрия при вторичном модифицировании 1%-ным ферросилицием марки ФС 75



а



б

Рис. 2. Форма включений графита в высокопрочном чугуне: а – до введения иттрия; б – после введения 0.20% иттрия

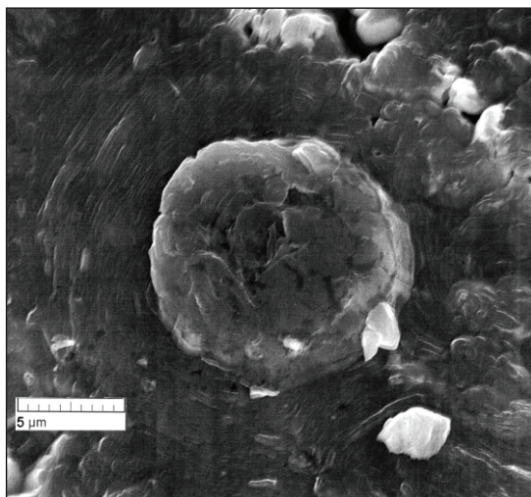
Данное обстоятельство играет ключевую роль в изменении физико-механических свойств чугуна. Производство и использование высокопрочного чугуна с ШГ в машиностроении, особенно взамен стали и чугунов легированных хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием и другими элементами, в значительной степени определяют технологичность, экономическую эффективность в производстве и высокие эксплуатационные свойства деталей, изготовленных из такого чугуна. А это, в свою очередь, приводит к снижению потребления дефицитных материалов и затрат труда, а также способствует сохранению экологической чистоты природы [3].

Следует отметить, что не все вопросы технологии производства высокопрочного чугуна с ШГ достаточно разработаны. Отсутствие общепринятого механизма образования ШГ, как и детальных связей между технологическими факторами, образованием и свойствами ШГ и характеристиками металла объясняются не только сложностью и многопараметровостью процессов, но и в немалой степени недостаточностью знаний о самом ШГ. Например, рядом работ [4–6] установлено, что изменение шаровидности частиц может отображать существенное изменение его функциональных характеристик, однако причины таких изменений и связей практически не изучены.

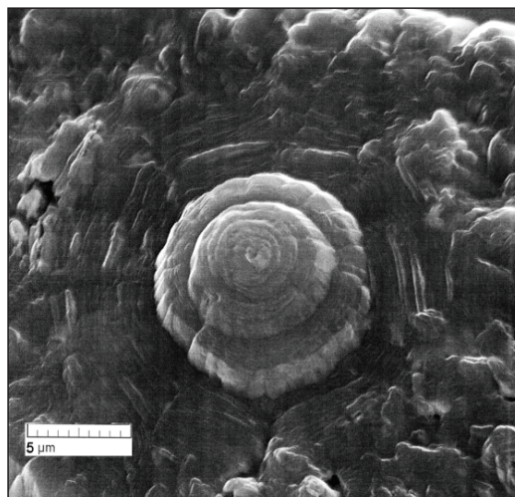


В ходе проведенных нами исследований установлено, что ШГ является слоисто-спиральной системой микро- и нанообразований, неоднородной по фазовому составу, структуре и элементному составу с преимущественно периодическим чередованием близких слоёв. Это иллюстрируется на рис. 2, 3, где представлены

характерные электронно-микроскопические изображения частицы ШГ в образце чугуна, легированного иттрием, до и после травления ионами аргона. Видно (см. рис. 3), что шаровидный графит не однороден, имеет несколько зон, отличных друг от друга как по строению, так и по свойствам и составу.



*a*



*б*

Рис. 3. Фрактограммы включения шаровидного графита (сканирующий электронный микроскоп MIRA (TESCAN): *a* – на изломе образца; *б* – внутреннее строение включения шаровидного графита после ионного травления аргоном

Такие системы могут обладать свойствами и их сочетаниями, существенно иными, нежели отдельные микро- или наночастицы и обычные композиты на их основе. Несомненный интерес представляет то, что сравнительно малые изменения свойств таких частиц, например их шаровидности, существенно влияют на свойства композита даже при их малой концентрации.

Как показывают исследования, уникальность ШГ не исчерпывается его использованием в металлургии при производстве высокопрочных чугунов. Шаровидный графит в различных технологиях может использоваться, например как контейнер для хранения газов, в частности, водорода. Сочетание необычных механических, электронных и электродинамических свойств могут явиться основой ряда других применений.

Проведенные на настоящий момент исследования ШГ показали, что для объяснения причин его возникновения в высокопрочном чугуне, совершенствования технологии его производства, разработки новых способов его получения, определения областей его использования

необходимо провести комплексные исследования, в частности исследования распределения химического состава по объему, особенностей строения, термодинамики и кинетики образования зон и их свойств.

#### Список литературы

1. Убеллоде А. Р., Льюис Ф. А. Графит и его кристаллические соединения / пер. с англ. Е. С. Головина, О. А. Цуханова. М.: Мир, 1965. 257 с.
2. Аникши А. А. Иттриевый чугун. М.: Машиностроение, 1976. 94 с.
3. Ковалевич Е. В. Экологически безопасная технология получения чугуна с шаровидным графитом // Литейное производство. 2010. № 12. С. 2–5.
4. Ledbetter H., Datta, S. Cast Iron Elastic Constants : Effect of Graphite Aspect Ratio // Z. Metallkd. 1992. Vol. 83, № 3. P. 195–198.
5. Pundale S. H., Rogers R. J., Nadkarni G. R. Finite Element Modelling of Elastic Modulus in Ductile Irons : Effect of Graphite Morphology // AFS Trans. 2000. № 98–102. P. 99–105.
6. Li J., Lu L., Lai, M. O. Quantitative Analysis of the Irregularity of Graphite Nodules in Cast Iron // Materials Characterization. 2000. Vol. 45. P. 83–88.