

*На підставі металографічних, петрографічних і рентгеноспектральних досліджень представлено нові дані про будову та формування включень графіту кулястої форми у високоміцному чавуні. Виявлено нестехіометричні з'єднання заліза, магнію та інших елементів (субокісли), які беруть активну участь у формуванні включень графіту кулястої форми у високоміцних чавунах. Також встановлено три морфологічні різновиди графіту, з яких складаються включення у високоміцних чавунах*

*Ключові слова: кулястий графіт, газова бульбашка, окис магнію, металографія, петрографія, мікрорентгеноспектральний аналіз*

*На основании металлографических, петрографических и рентгеноспектральных исследований представлены новые данные о строении и образовании включений графита шаровидной формы в высокопрочном чугунах. Выявлены нестехиометрические соединения железа, магния и других элементов (субокислы), которые принимают активное участие в формировании включений графита шаровидной формы в высокопрочных чугунах. Также установлены три морфологические разновидности графита, из которых состоят включения в высокопрочных чугунах*

*Ключевые слова: шаровидный графит, газовый пузырек, окись магния, металлография, петрография, микрорентгеноспектральный анализ*

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ШАРОВИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ГРАФИТА В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ

**В. Г. Иванов**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: ivanov@zntu.edu.ua

**В. П. Пирожкова**

Кандидат технических наук,

старший научный сотрудник\*

E-mail: pirozhkova29@mail.ua

**В. В. Лунев**

Доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой\*

E-mail: mitlv@ukr.net

\*Кафедра машин и технологии

литейного производства

Запорожский национальный

технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

## 1. Введение

Механизм формирования шаровидного графита в чугунах остается наиболее спорным вопросом материаловедения. Конкуренция нескольких десятков гипотез образования шаровидного графита и современные возможности компьютерного моделирования до настоящего времени не создали единой общепринятой теории. Это, по-видимому, связано с большим количеством факторов, влияющих на данный процесс: природа шихтовых материалов, наличие примесей, условий плавки, модифицирования и т. д.

Раскрытие механизма образования шаровидного графита будет способствовать разработке общей теории модифицирования чугуна, откроет широкие возможности для управления его структурой и свойствами, позволит разрабатывать эффективные технологические процессы для получения литых изделий различного назначения из высокопрочного чугуна.

Получение новых данных о строении включений графита шаровидной формы, полученных с применением новых современных методов исследований и лабораторного оборудования, является актуальной задачей для решения данной проблемы.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Гипотез образования шаровидного графита в настоящее время насчитывается уже несколько десятков. Появление новых современных методов исследований, расширение возможностей исследовательского оборудования и компьютерного моделирования создают условия для подтверждения или опровержения справедливости существования той или иной гипотезы.

В работе [1] изложены современные взгляды на механизм формирования шаровидных включений графита в чугунах и намечены перспективы для дальнейших исследований этого явления.

По мнению авторов работы [2] образование шаровидной формы графита в чугунах связано с очищением от поверхностно-активных элементов и их нейтрализацией. В первую очередь от серы, кислорода и др. примесей. Эта версия находит все большее число сторонников в настоящее время.

Однако с момента получения шаровидного графита в чугунах преобладающей была теория «газовых пузырьков», которые формируются за счет паров магния, водорода или других газов. Как справедливо отмечается в работе [3], это, вероятно, связано с очевидной

привлекательностью и тождественностью формы газового пузырька и графитного шаровидного включения. Поэтому попытки теоретического обоснования этой гипотезы продолжаются и в настоящее время [4]. Так появляются попытки связать пузырьковую теорию с новыми экспериментальными данными, например, открытием новой модификации углерода – фуллеренов и обнаружения их в железоуглеродистых сплавах [5, 6].

По версии авторов работ [7, 8], газом, способствующим образованию шаровидного графита в высокопрочных чугунах, является окись углерода – CO. Такие сильные раскислители, как магний или редкоземельные металлы (иттрий, церий, лантан и др.) эффективно реагируют с кислородом. Например, по известной реакции:



Отмечается [7], что при температурах жидкого чугуна эта реакция протекает слева направо, очень интенсивно и почти до конца. В результате того, что из двух газообразных тел образуются два твердых тела с высокой прочностью и высокой температурой плавления, во многих местах жидкого чугуна создаются области с вакуумом. Первоначальные пузырьки магния уменьшаются с 2 мм до 2–3 мкм в результате прохождения реакции, одновременно внутрь диффундирует водород, а на поверхности раздела откладывается углерод при снижении растворимости в железе и уменьшении температуры. Таким образом, рост графита происходит от периферии к центру.

В работе [9] образование полостей, которые заполняются графитом, предполагается связывать с разрывом сплошности расплава при введении элементов, активных к растворенному кислороду. Этот процесс сопровождается образованием газообразных оксидов низшей валентности или напротив – твердых оксидов, молярный объем которых меньше суммы молярных объемов оксидообразующего элемента и кислорода, или даже самого оксидообразующего элемента (явление «дефекта объема»).

Изучению внутреннего строения графита шаровидной формы в настоящее время также уделяется большое внимание. Так в работе [10] с помощью светового и растрового электронного микроскопов подтверждено, что включение графита имеет поликристаллическое строение и состоит из кристаллов пирамидальной формы. Такая версия отвечает сложившимся представлениям о строении включения графита шаровидной формы в высокопрочном чугуне и поддерживается большинством специалистов по графитизированным чугунам.

Однако в работе [11] с помощью рентгеноструктурного анализа установлено, что включения графита в чугуне не представляют собой поликристаллы, а имеют скорее турбостратную структуру. В такой структуре отсутствует строгая упорядоченность слоев, присущая кристаллической структуре графита. Поэтому механизмы формирования графита, основанные на кристаллографических соображениях нельзя признать окончательными.

Для расширения знаний о структуре включений графита и механизме их формирования в чугунах при-

меняются также другие современные методы анализа: цветовая микроскопия [12], электронная микроскопия [13], нанотомография [14] и др. методы.

Особый интерес при изучении строения и формирования включений графита шаровидной формы в чугунах связан с влиянием газовой фазы (кислорода, водорода, азота и др. газов), продуктов реакции этих элементов с углеродом или элементами – сфероидизаторами (магнием, кальцием и др.) и образованием нестехиометрических соединений.

Одним из универсальных методов исследования таких процессов является петрографический метод, который позволяет изучать графитовые включения не только в отраженном, но и в проходящем свете. Однако в литературе данному методу исследований при анализе включений графита в чугунах не уделяется существенного внимания. Данные по петрографическому анализу графитовых включений практически отсутствуют. Поэтому в данной работе, в дополнение к металлографическому и рентгеноспектральному методам исследования включений графита, привлечен и петрографический метод, обладающий более широкими возможностями.

---

### 3. Цель и задачи исследования

---

Проведенные исследования ставили целью подтвердить и дополнить «пузырьковую» теорию образования включений графита шаровидной формы в высокопрочных чугунах при модифицировании магнием.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовать морфологию шаровидного графита в высокопрочных чугунах с привлечением металлографических, петрографических и рентгеноспектральных методов;
- установить механизм и этапы формирования шаровидной формы графита в высокопрочных чугунах модифицированных магнием.

---

### 4. Материалы и методика исследования шаровидного графита в чугунах

---

#### 4. 1. Технология получения образцов высокопрочного чугуна для исследования включений графита

Высокопрочный чугун выплавляли в индукционной печи емкостью 30 кг. Для получения шаровидной формы графита на дно ковша давали 0,5–0,7 % никель – магниевой лигатуры (15 % Mg) и 0,8–1,0 % ферросилиция с барием (ФС65Ba1). Химический состав чугуна соответствовал марке ВЧ 500-2 (ДСТУ 3925-99). На центробежном станке получали цилиндрические маслотно заготовки с внешним диаметром 65 мм и длиной 175 мм. Также отливали стандартные пробы согласно ДСТУ3925-99 в песчаные формы для контроля химического состава и структуры чугуна.

Из отливок, полученных различными способами, в литом состоянии и после графитизирующего отжига, вырезали образцы для исследования.

#### 4. 2. Методика и оборудование для металлографического, петрографического и рентгеноспектрального анализов

Шлифы готовили по общепринятой методике. Металлографический анализ проводили с использованием микроскопов МИМ-7 и «Zeiss. Epityp-2».

Петрографические исследования выполняли в отраженном свете на микроскопе МБИ-6 при увеличениях 90–1900 крат. Экстрагирование включений шаровидного графита с поверхности шлифа осуществляли с помощью препараторской иглы под стереоскопическим микроскопом МБС-2. Оптические свойства выделенных включений определяли с использованием стандартных наборов иммерсионных жидкостей на кристаллооптическом микроскопе МИН-8 при увеличениях 100–1000 крат по методике, предложенной в работе [15]. В проходящем свете определяли форму, размеры и другие свойства графитовых включений.

Микрорентгеноспектральный анализ проводили с помощью электронных растровых микроскопов SUPRA 40 WDS (Karl Zeiss) и JSM-6360 с приставками INCA 350 Oxford Instrumentals и JED 2300 соответственно.

#### 5. Результаты исследований шаровидных включений графита в высокопрочных чугунах

Проведенные исследования в отраженном свете на универсальном микроскопе МБИ-6 позволили выявить и установить следующее. Подавляющее количество включений шаровидного графита в чугунах несут наследственность кристаллической гексагональной решетки графита – сфера их в сечении шлифа оконтурена шестью гранями и состоит из шести звеньев конусовидной формы, вершины которых сходятся в центре включения.

Микроструктура всех звеньев гетерогенна и поликристаллическая. У некоторых включений обнаруживается – канал питания газового пузырька (рис. 1, а). Немаловажный интерес представляют включения, у которых не завершён процесс сферообразования. В центре таких включений наблюдается гексагональная форма графита, полость которого выполнена конденсатом газовой фазы: субокислы кальция, алюминия, кремния и др. которые перекрывают диффузию СО в газовый пузырек (рис. 1, б). Что касается газового пузырька, то его полость лучше выявляется в проходящем свете в иммерсионных препаратах (рис. 1, в).

Как видно (рис. 1, в), округлая форма пузырька оконтурена шестью гранями (наследственность кристаллической решетки графита) и снабжена каналом питания. Образовавшаяся оболочка пузырька очень тонкая (1,5–2,0 мкм), достаточно хрупкая, легко выкрашивается при изготовлении шлифа, прозрачна, светло-серого цвета со слабым зеленоватым оттенком. Оболочка аморфна, оптически изотропна, обладает высоким и переменным показателем преломления  $N=1,750-1,770$ , указывающим на сложный и переменный состав твердого раствора пузырька. Стенки канала питания утолщаются от пузырька до основания гексагонального графита, достигают 3–4

и более мкм, отличаются явно выраженным серовато-зеленоватым цветом, полупрозрачны, изотропны. Показатель преломления  $N=1,770$  и выше, что тоже свидетельствует об образовании твердого раствора сложного и переменного состава.

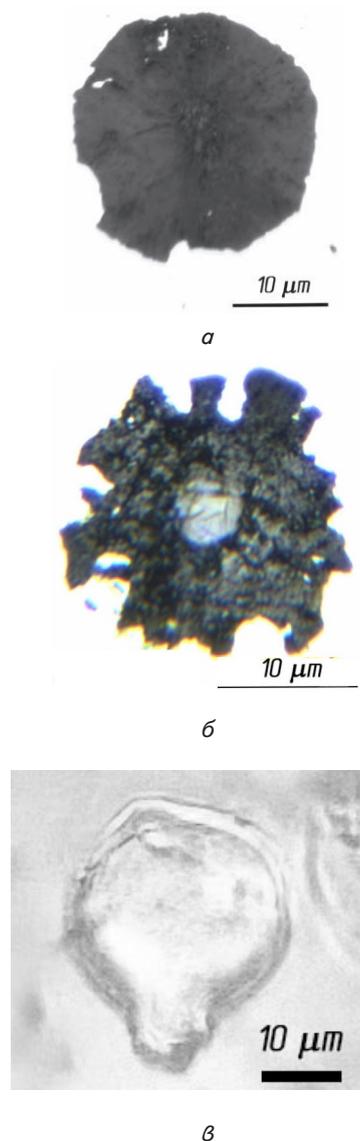


Рис. 1. Включения графита и оболочка для его формирования: а – сформировавшееся включение графита шаровидной формы, соединенное с каналом питания (в отраженном свете); б – несформировавшееся полностью графитовое включение с шестигранной формой графита – основой или устьем канала питания в центре (в отраженном свете); в – оболочка газового пузырька с каналом питания (в проходящем свете)

Следует отметить, что периклаз – MgO отличается кубической кристаллической структурой, прозрачен, бесцветен, изотропен, показатель преломления  $N=1,737$ , отвечающий стехиометрическому составу. Легко определяется в проходящем свете.

На рис. 2 представлены разновидности включений графита шаровидной формы, которые наблюдались в исследуемом чугуне.

Таблица 1

Результаты локального микрорентгеноспектрального анализа (рис. 4)

Точка анализа	Содержание элементов, масс. доля, %							Итого
	C	O	Mg	Si	Mn	Fe	Ni	
1	96.05	2.68	0.26	–	–	1.00	–	100.00
2	95.79	2.97	0.21	–	–	1.02	–	100.00
3	96.11	2.89	0.14	–	–	0.85	–	100.00
4	89.97	7.17	–	–	–	2.86	–	100.00
5	96.41	2.41	0.17	–	–	1.00	–	100.00
6	93.27	5.22	–	–	–	1.51	–	100.00
7	11.80	–	–	2.86	1.01	82.57	1.75	100.00
8	4.69	–	–	3.13	0.83	89.44	1.91	100.00

**6. Обсуждение результатов исследования включений графита шаровидной формы в высокопрочном чугуне**

Таким образом, полученные данные и общеизвестные свойства магния, как одного из сильных раскислителей и наиболее распространенных сфероидизаторов, позволяют представить следующий механизм образования шаровидной формы графита, обусловленный интенсивным взаимодействием магния с окисью углерода по реакции



Такая реакция протекает со «взрывом» и одновременным образованием газового пузырька, канала питания, основанием которого является графит шестигранной формы с полостью в его центральной части. Оболочка пузырька и канал питания состоят из метастабильной субокиси магния. Наличие Mg<sub>2</sub>O авторы [15] находили в грубых дефектах «расслоения» стали 45Г17Ю3. Кроме того, о существовании субоксида Mg<sub>2</sub>O известно из других работ [16].

Все три составляющие неразрывно связаны между собой и представляют единую систему, по которой осуществляется диффузия окиси углерода и других газов (SiO, AlO, Si<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O, Ca<sub>2</sub>O и др.), растворенных в жидком чугуне. На рис. 1, а, б показана шаровидная форма графита, соединенная с каналом питания, и основа – устье канала питания. Иными словами, в процессе взаимодействия магния с окисью углерода образовалась единая система, благодаря которой осуществляется диффузия газовой фазы и формирование, так называемого шаровидного графита.

Необходимо отметить, что в условиях дефицита кислорода в чугуне, из-за высокого содержания кремния, марганца и других элементов с высоким сродством к кислороду, образуются соединения пониженной валентности.

Эти свойства присущи всем металлам, особенно переходным. Так металлы первых трех групп периодической системы только в обычных условиях образуют соединения нормальной валентности, а при высоких температурах – пониженной валентности [17]. Это находит подтверждение в металле после электрошлакового переплава, где также наблюдается дефи-

Представленные включения графита отличаются большим разнообразием строения центральной и периферийных зон, наличием пор и разрывов, присутствием инородных фаз и соединений.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа включений графита приведены на рис. 3. В табл. 1 приведены результаты локального точечного анализа включений графита, согласно рис. 4.

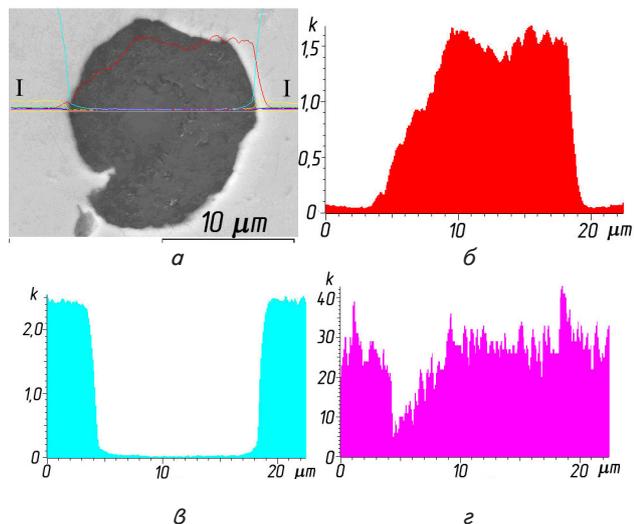


Рис. 3. Распределение некоторых элементов по диаметру включения графита шаровидной формы: а – включение графита и линия сканирования микрозондом (I – I); б – распределение углерода, в – распределение железа; г – распределение магния

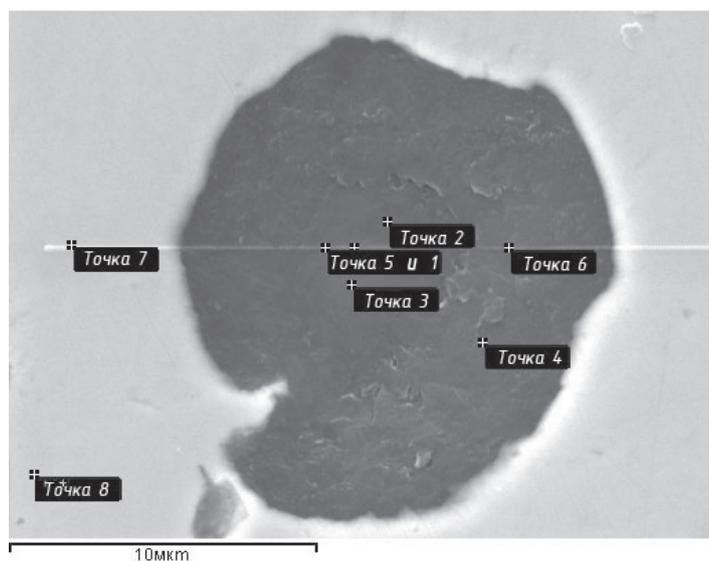


Рис. 4. Микроструктура высокопрочного чугуна и точки локального микрорентгеноспектрального анализа графитового включения (точки 1–6) и металлической матрицы (точки 7, 8)

Как можно увидеть из рис. 3 и данных табл. 1 во включениях графита кроме углерода присутствуют также другие элементы: магний, железо, кислород.

цит кислорода и образование соединений пониженной валентности –  $\text{Ca}_2\text{O}$ ,  $\text{Si}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}$  [18, 19].

Окись углерода, диффундируя в полость пузырька, диспропорционирует – распадается, на графит и газ по реакции



Образовавшийся таким образом графит имеет таблитчатую форму (агрегаты тонких листочков, прямоугольных или шестиугольных пластинок) и множества мелких частиц различной формы. Тончайшие пластины графита светло-серого цвета прозрачны, анизотропны, показатель светопреломления  $N=1,98$  и выше. Агрегаты таких пластин непрозрачны, изотропны, серого цвета с матовой поверхностью. Некоторые пластины и агрегаты пластин графита, что интересно, магнитны или слабомагнитны. В сечении шлифа распределение этих агрегатов наблюдается по шести сегментам, начиная от периферии (откладываются крупные таблитчатые кристаллы), к центру – мелкие частицы графита. Затем, по мере поступления окиси углерода, таблитчатые кристаллы плотно откладываются по всему периметру газового пузырька, формируя, таким образом, шаровидную форму графита и заполняя ее полностью или частично.

Полное заполнение газового пузырька осуществляется при свободном доступе окиси углерода – когда открыт канал питания (рис. 2, а), а частичное – когда канал питания перекрыт конденсатом газовой фазы, растворенной в жидком чугуна (рис. 2, б).

Увеличивающееся количество графита в объеме пузырька постепенно вытесняет газовую фазу ( $\text{CO}_2$  и другие газы), что приводит к разрыву оболочки пузырька и, соответственно, к образованию извилистого или зигзагообразного контура включения графита шаровидной формы. Нередко разрывы проходят более глубоко – по границам того или иного сегмента, разрывая их полностью или частично (рис. 2, в, г).

Следует отметить, что наряду с формированием включений графита шаровидной формы и, соответственно, заполнением его объема графитом, заполняется и канал питания, на котором наращиваются шестиугольные пластинки графита (рис. 1, б).

Наслоение тонких базисных слоев графита друг на друга приводит к утолщению стенок «зарастанию» канала питания и, соответственно, к сужению его полости. Окись углерода, поступающая через узкий канал питания в оставшийся объем пузырька, обладает уже иными свойствами – не диспропорционирует. Она находится в так называемом «закаленном» состоянии, имеет пленочную форму, аморфную или скрытокристаллическую микроструктуру, обладает сильным металловидным блеском. Распределяется веерообразно от канала питания к периферии шестиугольных конусовидных звеньев, покрывая всю поверхность ранее образовавшихся первичных кристаллов графита (рис. 2, а, в).

На этом прекращается процесс полного формирования шаровидных включений графита. В случае перекрытия канала питания конденсатом субокислов других элементов (кальция, алюминия, кремния и др.), растворенных в жидком чугуна, дальнейшее формирование шаровидной формы графита прерывается (рис. 2, б).

Следует подчеркнуть о роли примесей – субокислов, растворенных в жидком чугуна.

Выше отмеченные субокислы кремния, алюминия, кальция, магния, что характерно, обладают такими же свойствами, как и окись углерода. Малоустойчивые  $\text{SiO}$  и  $\text{AlO}$ , подобно  $\text{CO}$ , диффундируют в объем газового пузырька и диспропорционируют на металл и окисел высшей валентности, образуя при этом типичные структуры распада. Иногда такие структуры наблюдаются вблизи канала питания, на поверхности уже образовавшегося графита. Более устойчивые субокислы  $\text{Al}_2\text{O}$ ,  $\text{Si}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}_2\text{O}$  присутствуют, как и  $\text{Mg}_2\text{O}$ , в метастабильном состоянии. Субокислы взаимодействуют между собой, хорошо растворяются в своих окислах, образуя твердые растворы сложного и переменного нестехиометрического состава. Они, как и вторичный графит, диффундируют в объем газового пузырька, не диспропорционируют, находятся в «закаленном» состоянии. Конденсируются вблизи канала питания и, нередко, в больших количествах, нарушают процесс формирования шаровидной формы графита. Кроме того, субокислы закрывают канал питания, блокируя тем самым доступ окиси углерода в объем газового пузырька (рис. 2, б).

Согласно данным качественного микрорентгено-спектрального анализа, по диаметру включения графита шаровидной формы зафиксировано наличие магния (рис. 3).

При этом, как видно (рис. 3, г), повторяющиеся пики магния свидетельствуют о неоднородности субокиси магния, то есть пузырька, что хорошо согласуется с вышеприведенными оптическими свойствами.

Количественный микрорентгено-спектральный анализ в отдельных точках подтверждает неоднородность образовавшейся системы питания (рис. 4 и табл. 1).

Весовые содержания магния, кислорода и железа приведенные в табл. 1, хорошо сочетаются между собой и свидетельствуют об образовании сложного нестехиометрического состава субокислов магния и железа. На основании оптических свойств системы питания и микрорентгено-спектрального анализа можно сделать следующий вывод: в момент взаимодействия магния с окисью углерода образуется сложная по составу метастабильная газовая фаза субокислов магния и железа.

Следует отметить, что паровая – субокисная фаза железа хорошо взаимодействует с окисью углерода, в результате чего некоторые пластины графита приобретают магнитные свойства. Другими словами, субокись железа, взаимодействуя с  $\text{CO}$ , принимает участие не только в процессе образования системы питания, но и формирования шаровидной формы графита.

Дальнейшее исследование включений графита, по-видимому, следует проводить с привлечение масс-спектрометрического анализа, позволяющего определить изотопный и молекулярный состав газовой фазы и твердых соединений во включениях графита. Такой метод исследований является перспективным, так как позволяет учесть определенные ограничения, присущие данному исследованию. Среди них, очевидно, необходимо отметить невозможность определения точного состава субокислов магния, железа и др. элементов. Получение таких фактических данных, безусловно, расширит представления о формировании включений графита шаровидной формы и

будет способствовать увеличению производства отливок из высокопрочного чугуна.

## 7. Выводы

1. Выявлено три морфологических разновидности графита, образующихся в различные периоды изменения физико-химических условий жидкого чугуна: в момент взаимодействия магния с окисью углерода – четко ограниченная шестигранная; в период диспропорционирования окиси углерода в объеме газового пузырька – агрегаты кристаллов различной формы; в период «закалки» окиси углерода – пленочная (скрытокристаллическая).

2. Предложен новый механизм образования шаровидной формы графита, который обусловлен интенсивным взаимодействием магния с окисью углерода и

одновременным образованием газового пузырька, канала питания, состоящих из метастабильной субокиси магния, и графита, представляющего основу – устье для канала питания. Образовалась единая система питания, по которой осуществляется диффузия окиси углерода и других газов, растворенных в жидком чугуне. Установлено, что полное заполнение всего объема газового пузырька графитом осуществляется в три этапа: первые два этапа – первичным графитом, который осаждается на внутренней оболочке пузырька, начиная от периферии к центру, затем формирует шаровидную форму графита и третий заключительный – вторичным графитом.

Показано, что наличие примесей нарушает процесс формирования шаровидной формы графита и, в таком случае, объем газового пузырька заполняется в два этапа, преимущественно, кристаллами первичного графита.

## Литература

1. Östberg, G. Perspectives on research on the formation of nodular graphite in cast iron [Text] / G. Östberg // Materials & design. – 2006. – Vol. 27, Issue 10. – P. 1007–1015. doi: 10.1016/j.matdes.2005.02.010
2. Найдек, В. Л. Шаровидный графит в чугунах [Текст] / В. Л. Найдек, И. Г. Неижко, В. П. Гаврилюк // Процессы литья. – 2012. – № 5. – С. 33–42.
3. Соценко, О. В. Особенности агрегативного механизма формирования структуры шаровидного и вермикулярного графита в модифицированных чугунах [Текст] / О. В. Соценко // Металл и литье Украины. – 2012. – № 12 (235). – С. 3–10.
4. Баранов, А. А. К теории образования в чугуне шаровидного графита [Текст] / А. А. Баранов, Д. А. Баранов // Металл и литье Украины. – 2003. – № 9-10. – С. 42–45.
5. Роговский, А. Н. О современных теориях и гипотезах формирования шаровидного графита в литой структуре чугунов [Текст] / А. Н. Роговский, А. А. Шпильников // Литейное производство. – 2014. – № 4. – С. 5–7.
6. Кузеев, И. Р. Формирование фуллеренов в структуре железоуглеродистых сплавов в процессе кристаллизации, фазовых переходов и деформации [Текст] / И. Р. Кузеев, М. М. Закирничная, С. В. Попова, М. Р. Гималова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 6. – С. 411–419.
7. Горшков, А. А. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна [Текст] / А. А. Горшков, М. В. Волощенко, В. В. Дубров, О. Ю. Крамаренко; под общ. ред. А. А. Горшкова. – Москва – Киев: Машгиз, 1961. – 300 с.
8. Karsay, S. I. Ductile Iron Production Practice [Text] / S. I. Karsay. – Amer Foundry Society Inc, Des Plaines, Illinois, 1987.
9. Колотило, Д. М. Еще одна версия генезиса формы графита в чугуне [Текст] / Д. М. Колотило // Литейное производство. – 1998. – № 7. – С. 15–16.
10. Чаус, А. С. Особенности внутреннего строения шаровидного графита в высокопрочном чугуне [Текст] / А. С. Чаус, Я. Сойка, Л. Чаплович // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 4. – С. 9–13.
11. Pencea, I. New aspects regarding the structure of spheroidal cast iron carbon inclusions revealed by WAXD investigations [Text] / I. Pencea, D. M. Ștefănescu, R. Ruxanda, F. V. Anghelina // Key Engineering Materials. – 2011. – Vol. 457. – P. 120–125. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.457.120
12. Zhou, J. Colour metallography of cast iron [Text] / J. Zhou // China Foundry. – 2011. – Vol. 8, Issue 4. – P. 447–462.
13. Pradhan, S. K. Micro Raman spectroscopy and electron probe microanalysis of graphite spherulites and flakes in cast iron [Text] / S. K. Pradhan, B. B. Nayak, B. K. Mohapatra, B. K. Mishra // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2007. – Vol. 38, Issue 10. – P. 2363–2370. doi: 10.1007/s11661-007-9288-1
14. Hatton, A. Characterization of graphite crystal structure and growth mechanisms using FIB and 3D image analysis [Text] / A. Hatton, M. Engstler, P. Leibenguth, F. Mücklich // Advanced Engineering Materials. – 2011. – Vol. 13, Issue 3. – P. 136–144. doi: 10.1002/adem.201000234
15. Лунёв, В. В. Неметаллические включения в сталях, чугунах и ферросплавах [Текст] / В. В. Лунёв, В. П. Пирожкова, С. Г. Грищенко. – Запорожье: Днепровский металлург, 2006. – 348 с.
16. Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст]: Справочник: В 3 т.: Т. 3. Кн. I / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001 – 872 с.
17. Беляев, А. И. Одновалентный алюминий в металлургических процессах [Текст] / А. И. Беляев, Л. А. Фирсанова. – М.: Металлургиздат, 1959. – 141 с.
18. Патон, Б. Е. Поведение кальция при ЭШП [Текст] / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, А. Г. Богаченко, Н. В. Пятница // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1988. – № 3. – С. 8–15.
19. Воронов, В. А. К вопросу выбора оптимальных концентраций раскислителей при выплавке сплавов на основе железа [Текст] / В. А. Воронов, Б. М. Никитин, В. В. Добродин, Н. В. Пятница. – Сб. Металлургические методы повышения качества стали. – М.: Металлургия, 1979. – С. 154–160.