

**О. А. Могилевцев**, канд. техн. наук, доцент**С. А. Стороженко**, канд. техн. наук, доцент, e-mail: storog69@ukr.net**А. В. Златоустов**, магистр

Днепропетровский государственный технический университет, Каменское

## Процессы модифицирования чугуна магнием

*Ни одна из существующих теорий образования шаровидного графита в магниевом чугуне не может объяснить всех явлений, которые наблюдаются на практике. Предложенная авторами гипотеза, основанная на конденсации мелких пузырьков магния при охлаждении жидкого чугуна, объясняет не только форму включений шаровидного графита, но и другие факты, например, отсутствие эффекта модифицирования, если при введении магния пузырьки не образуются.*

**Ключевые слова:** магниевый чугун, пузырьки, конденсация паров магния, модифицирование, сфероидизация графита, давление, температура.

**В**ведение. Механические и специальные свойства чугуна в решающей степени зависят от содержания углерода. При кристаллизации по стабильной системе форма графитных включений может быть весьма разнообразной. Ее принято называть пластинчатой, междендритной, гнездообразной, вермикулярной, компактной, шаровидной. Большинство исследователей считает, что образованию шаровидного графита (ШГ) способствует ввод в чугун таких элементов, как магний, церий, других редкоземельных металлов (РЗМ), иттрий, кальций, натрий и другие. Однако с этим утверждением трудно согласиться. Шаровидные включения, получаемые при вводе разных элементов, мало похожи друг на друга. Вполне возможно, что и механизм их образования разный. Практика показала, что только при обработке чугуна магнием можно получить графитные включения правильной шаровидной формы. При обработке РЗМ кальцием и некоторыми другими элементами получается графит той или иной степени компактности, но не шаровидный.

*Цель работы* – анализ процессов образования ШГ в магниевом чугуне.

*Результаты и их обсуждение.* Способ обработки чугуна магнием был предложен в 1949 году А. Гагниним, К. Милисом и Н. Пилингом [1].

Благодаря исключительному сочетанию механических, литейных свойств, простоте технологии получения, низкой стоимости чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) стал в настоящее время основным промышленным сплавом в мировом литейном производстве.

Для получения ШГ необходимо, чтобы чугун содержал, по разным данным, 0,03–0,1 % «остаточного» магния. В каком состоянии этот магний находится, точно неизвестно, по этому поводу существуют разные мнения. В частности, установлено, что растворимость магния в железе невелика.

Ввести магний в жидкий чугун непросто. Это связано с низкой температурой кипения магния (1107 °С).

Кроме того, магний значительно легче жидкого чугуна и может плавать на его поверхности. Поэтому попытка ввести в чугун чистый металлический магний приводит к взрывообразному его вскипанию и сгоранию образующихся паров на воздухе ослепительно белым пламенем (пирозэффект), что часто сопровождается выбросом жидкого металла из ковша. Тем не менее, такой способ ввода применялся на практике. Например, на Днепропетровском чугуновальцевальном заводе (ДЧВЗ, ныне ДЗПВ) на протяжении многих лет получали ЧШГ именно таким способом. Часть жидкого чугуна отливали в другой ковш, а в основной 35-тонный ковш с помощью мостового крана опускали на штанге перфорированный стальной контейнер с чушковым магнием. Реакция была весьма бурной, ночью облака над заводом ярко светились отраженным светом, но усвоение магния было неплохим – до 40 и даже 50 %. Потом отлитый металл возвращали в основной ковш.

Литейщики разработали несколько способов более спокойного ввода магния в жидкий чугун.

Один из способов основан на том, что температура кипения магния (как и любой другой жидкости) повышается с увеличением давления. Напомним, что кипение жидкости происходит, если давление насыщенных паров больше внешнего давления. Зависимость давления (мм рт. ст.) насыщенного пара магния от температуры описывается уравнением [2]:

$$\lg P_{\text{Mg}} = -7550 \cdot T^{-1} - 1,41 \cdot \lg T + 12,79.$$

Если давление выразить в паскалях, получим:

$$\lg P_{\text{Mg}} = -7550 \cdot T^{-1} - 1,41 \cdot \lg T + 14,91. \quad (1)$$

По другим данным [3] (после перехода к паскалям):

$$\ln P_{\text{Mg}} = 43,537 - 18062 \cdot T^{-1} + 5,867 \cdot 10^{-4} T - 2,728 \cdot \ln T. \quad (2)$$

Результаты расчета по формулам (1) и (2) практически одинаковы. Соответствующая кривая показана на рис. 1.

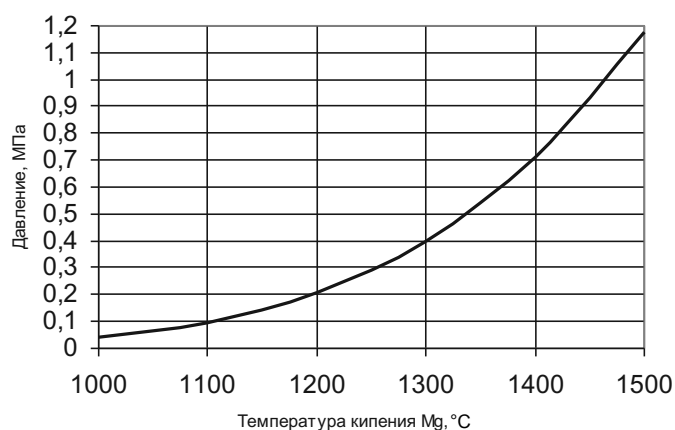


Рис. 1. Зависимость температуры кипения Mg от давления

Как видно, при давлении около 0,7 МПа температура кипения магния поднимается до температуры жидкого чугуна (1400 °C).

При вводе магния таким способом ковш с чугуном помещают в специальную камеру-автоклав. В ней создается давление, при котором температура кипения магния близка к температуре чугуна в ковше. Давление создают либо отдельным компрессором, либо парами магния, образующимися при его кипении. При повышенном давлении магний вводят в чугун в контейнере на штанге.

Было установлено, что при отсутствии выделения пузырей газообразного магния (когда давление в автоклаве слишком высокое, и температура кипения магния выше температуры чугуна) усвоение магния чугуном не происходит. Попытка применения специальной мешалки ничего не дала. На практике в процессе ввода магния давление в автоклаве понемногу стравливают, поддерживая барботаж. При этом усвоение магния высокое – до 80 % и более.

Другой вариант ввода магния, основанный на том же принципе, – применение специального герметизированного ковша конструкции ЦНИИТМАШ. Давление в ковше создается парами магния. Для поддержания постоянного барботажа в крышку ковша вставляют пористый литейный стержень, который постепенно пропускает пары магния, снижая давление в ковше.

Оба указанных варианта успешно и достаточно широко применялись на практике.

Другой способ спокойного ввода магния в чугун – ввод его в виде лигатуры, то есть сплава, содержащего 5–15 % Mg. На практике нашли широкое применение лигатуры Ni – Mg; Cu – Mg; Si – Mg и некоторые другие, более сложного состава. Преимущество первых двух состоит в том, что они тяжелее чугуна и не требуют специальных мер для удержания их в жидком металле. Их недостаток – дороговизна и дефицитность. При вводе в чугун магниевых лигатур всегда имеет место умеренный барботаж. Недостатком способа является необходимость предварительного приготовления лигатуры. Такой способ получения ЧШГ распространен на практике.

Третий способ заключается в постепенном дозированном вводе дробленого (фрезерованного или гранулированного) магния путем вдувания в струе газа. Вдувание широко используется с целью глубокой внепечной десульфурации доменного передельного чугуна. Происходящие при этом процессы рассмотрены в работе [4].

Постепенный регулируемый ввод магния осуществляется также при помощи трайб-аппарата в виде порошковой проволоки.

Недостатком указанных способов является сложность оборудования и необходимость соответствующей подготовки магния.

Перспективным является модифицирование чугуна в литейной форме. В форме устраивают камеру, в которую помещают дробленую лигатуру или смесь порошкового магния и ферросилиция. При заливке чугун проходит через эту камеру, насыщается магнием и затем очищается, проходя через центробежный шлакоуловитель. Пирозэффект и дымовыделение полностью отсутствуют, усвоение магния приближается к 100 %. Однако и этот способ не свободен от существенных недостатков: нужно применять чугун с низким содержанием серы, камера занимает в форме значительное место, модификатор необходимо дробить и дозировать, и главное – необходимо отработать технологию для каждой формы отдельно и контролировать качество каждой отливки. Тем не менее, модифицирование в форме применяется на практике.

Следует подчеркнуть, что при любом способе ввода магния для достижения положительного результата необходимо образование пузырей магния в чугуне. Показано [5], что без пузырей не происходит даже десульфурация чугуна.

Начиная со времени получения ЧШГ, было выдвинуто несколько гипотез о механизме его образования, однако ни одна из них не в состоянии объяснить всех явлений, наблюдаемых на практике.

Рассмотрим основные теории (точнее, гипотезы), выдвинутые для объяснения шаровидной формы включений графита в магниевом чугуне.

Большое значение исследователи придают морфологии ШГ. Так, К. П. Бунин и его сотрудники [6] в 1955 году предположили, что пространственная форма ШГ представляет собой многогранник, форма которого навязана окружающими зёрнами аустенита. П. И. Степин [7], напротив, утверждал (в 1958 году), что включение ШГ является «шишкообразным образованием со сложной мозаичной поверхностью из полусферических элементов». Что касается внутреннего строения включения ШГ, то в настоящее время преобладает мнение, что оно состоит из пирамидальных или секторных блоков, причем базисные плоскости перпендикулярны радиусам сферы.

Хронологически первой была, по-видимому, гипотеза Б. С. Мильмана [8]. Он полагал, что при кристаллизации магниевых чугунов образуется метастабильная структура. Уже в твердом состоянии цементит быстро разлагается, в результате чего образуется графит, форма которого аналогична углероду отжига в ковком чугуне. Основным возражением можно

считать то, что морфология ШГ коренным образом отличается от углерода отжига.

По информации А. А. Горшкова [1], А. Де-Си выдвинул гипотезу, что зародышами ШГ являются микроскопические включения MgO. Однако под давлением многочисленных фактов сам автор вскоре отказался от этой гипотезы.

Многие исследователи придерживаются адсорбционной теории образования ШГ: Н. Г. Гиршович [9], К. П. Бунин, Ю. Н. Таран [6], Д. П. Иванов и другие.

Одни считают, что атомы (или ионы) магния адсорбируются на призматических гранях кристаллов графита и блокируют их, замедляя рост, другие – что магний связывает серу, адсорбированную на базисных гранях и тормозящую рост. Третьи полагают, что все дело в скорости самодиффузии атомов железа (Бунин, Таран). Во всех вариантах образование ШГ объясняют выравниванием скорости роста графитного кристалла в направлениях, параллельном и перпендикулярном базисной плоскости. Легко видеть, что при этом образовался бы не шаровидный кристалл, а параллелепипед или «таблетка» графита. В то же время, хорошо известно, что в ШГ базисные плоскости имеют форму сферы и расположены перпендикулярно ее радиусам. Одного этого факта достаточно, чтобы отвергнуть адсорбционные гипотезы в предложенной их авторами форме.

Позднее Ю. Н. Таран предложил гипотезу, что ШГ образуется в результате расщепления растущих пластинчатых включений. Этой же точки зрения придерживаются авторы работы [10] и некоторые другие. Однако эта гипотеза не имеет достаточного экспериментального подтверждения. Действительно, при таком расщеплении должно образоваться не сферическое, а, скорее, цилиндрическое включение (вертикальный графит?).

Л. П. Горушкина [11] полагает, что благодаря влиянию поверхностного натяжения графит, не смачиваемый чугуном, будет скапливаться в виде сферических образований вследствие коалесценции (слипания) отдельных «дозародышей». Непонятно только, какую роль здесь играет магний.

О. В. Соценко [12] предложил подобный коагуляционно-агрегативный механизм образования ШГ.

Некоторые авторы, например, А. А. Жуков [13, 14], А. П. Любченко [15], пытаются объяснить сфероидизацию графита, развивают сложные теории, привлекая даже представления квантовой механики.

Один из авторов настоящей статьи предложил гипотезу [16, 17], основанную на конденсации пузырьков магния при снижении температуры жидкого чугуна. Основные ее положения состоят в следующем.

Давление в пузырьке радиуса  $r$ , расположенном в чугуне на глубине  $H$ , складывается из трех составляющих: атмосферного, ферростатического и капиллярного давлений:

$$P = P_{ат.} + \rho_{ч} \cdot g \cdot H + \frac{2\sigma}{r}, \quad (3)$$

где  $\rho_{ч}$  – плотность жидкого чугуна;  $\sigma$  – поверхностное натяжение.

На рис. 2 показана зависимость давления от радиуса пузырька на глубине 0,5 м.

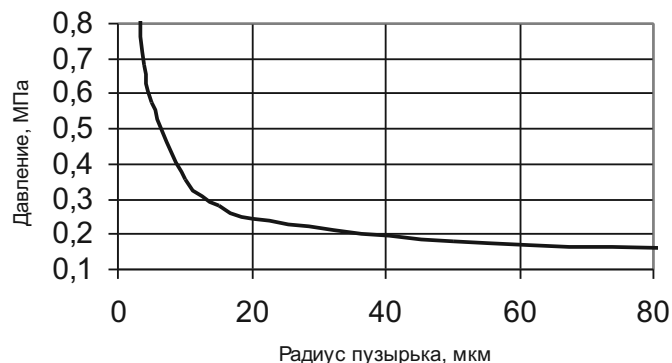


Рис. 2. Зависимость давления газа в пузырьке от его радиуса

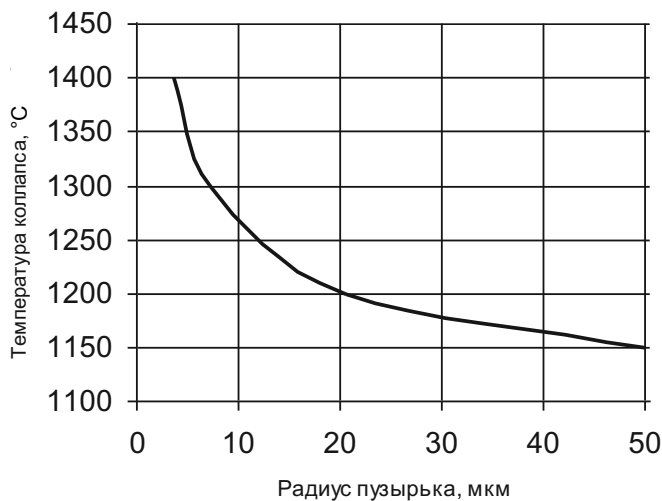
При вводе магния могут образоваться только такие пузырьки, радиус которых обеспечивает суммарное давление не более того, которое соответствует температуре кипения магния, равной температуре чугуна. Пузырьки меньшего размера не образуются. По мере снижения температуры чугуна и расхода магния на химические реакции размер пузырьков уменьшается, давление в них растет, температура кипения повышается. Когда она станет больше температуры чугуна, магний в пузырьках будет конденсироваться, переходя из газообразного состояния в жидкое. Пузырьки превратятся в капли жидкого магния.

Известно, что углерод в чугуне является поверхностно активным, поэтому он будет адсорбироваться на поверхности пузырьков любого радиуса. При конденсации (коллапсе) пузырька его поверхность уменьшается в сотни раз, соответственно увеличивается толщина адсорбированного слоя (при сохранении его объема). Внутри слоя происходит перестройка атомов углерода. При этом могут образоваться самые разнообразные кристаллические структуры. Как показано в работе [18], различие в свободной энергии различных кристаллических форм углерода невелико, поэтому образуется смесь из графита, фуллеренов, графена и других форм. Этим можно объяснить различные конфигурации включений ШГ (многогранные, шишковидные и др.). Важно, что в целом включение сохраняет сферическую форму и может служить зародышем ШГ.

В статье [16] было показано, что в образовании зародышей шаровидного графита могут принимать участие пузырьки магния радиусом от 4 до 50 мкм. Их коллапс будет происходить в процессе охлаждения чугуна от 1400 до 1150 °С. Вначале сконденсируются более мелкие пузырьки, затем – более крупные (рис. 3).

Расчет показывает, что при конденсации пузырька радиуса 4 мкм образуется капля радиуса 0,35 мкм, а пузырька 50 мкм – капля радиуса 2,6 мкм.

Стоит проверить, могут ли такие капли служить зародышами ШГ (пренебрегая толщиной слоя углерода на поверхности капли). Минимальное переохлаждение расплава, необходимое для роста зародыша радиуса  $r$ , равно [9]:



**Рис. 3.** Зависимость температуры конденсации газообразного магния от радиуса пузырька

$$\Delta T = \frac{2\sigma \cdot T_{кр}}{L\rho r}, \quad (4)$$

где  $T_{кр}$  – температура кристаллизации металла;  $L$  – теплота кристаллизации;  $\rho$  – плотность жидкого металла.

Принимая [9]  $T_{кр} = 1150^\circ\text{C}$ ;  $L = 250 \text{ кДж/кг}$ ;  $\rho = 7000 \text{ кг/м}^3$ , находим для капли радиуса 0,35 мкм  $\Delta T = 5,1 \text{ К}$ , радиуса 2,62 мкм  $\Delta T = 0,68 \text{ К}$ , что не противоречит реальности. В статье [16] показано, что расход магния, необходимый для образования зародышей ШГ, незначителен.

На основе предлагаемой гипотезы можно объяснить не только форму включений ШГ, но и другие

факты, имеющие место на практике, например, отсутствие модифицирующего эффекта, если при вводе магния пузыри не образуются. Далее, в центре включений ШГ наблюдается резко повышенное содержание магния, тогда как в самом графите магния практически нет [10]. В этой же центральной зоне при соответствующем увеличении часто видно «светлое пятно» [9]. По-видимому, это и есть капля магния, образовавшаяся при конденсации пузырька.

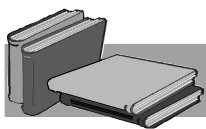
Если магниевый чугун затвердевает по метастабильной системе, субмикроскопические зародыши на основе сконденсированных капель магния дорастают при термообработке. При затвердевании белого магниевых чугуна всегда наблюдается некоторое количество мелких шаровидных включений графита.

Влияние демодификаторов и ремодификаторов подробно рассмотрено в литературе.

Труднее объяснить явление «перемодифицирования», когда при сверхоптимальном содержании магния в чугуне форма ШГ «портится». К сожалению, морфология таких «перемодифицированных» включений недостаточно изучена.

## Выводы

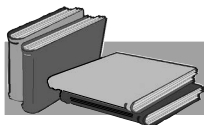
Существующие теории образования ШГ не объясняют всех фактов, имеющих место на практике. Наиболее обоснованной представляется гипотеза, основанная на конденсации магниевых пузырьков при снижении температуры жидкого чугуна.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков А. А., Волощенко М. В., Дубров В. В., Крамаренко О. Ю. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна. – М.-К.: Машгиз, 1961. – 300 с.
2. Стефанюк С. Л. Металлургия магния и других легких металлов: учебник для техникумов. – М.: Металлургия, 1985. – 200 с.
3. Химическая энциклопедия: В 5 т.: т. 2 / Под ред. И. Л. Кнунянца – М.: Сов. энцикл., 1990. – 671 с.
4. Могилевцев О. А., Стороженко С. А., Стороженко Т. И. Химические процессы при модифицировании чугуна вдуванием магния // Металл и литье Украины – 2016. – № 8-10. – С. 9–13.
5. Чубін К. І. Розвиток теорії та удосконалення технології десульфурзації чавуну вдуванням диспергованого магнію: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. І. Чубін [Дніпродзержинський державний технічний університет]. – Дніпродзержинськ, 2008. – 40 с.
6. Бунин К. П., Таран-Жовнир Ю. Н., Черновол А. В. Чугун с шаровидным графитом. – К.: АН УССР, 1955. – 97 с.
7. Степин П. И. Исследование первичных структурных образований в чугуне // Литейное производство. – 1952. – № 5. – С. 13–19.
8. Мильман Б. С. Сверхпрочный чугун со сфероидальным графитом в литой структуре // Вестник машиностроения. – 1949. – № 12. – С. 30–42.
9. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 564 с.
10. Вертман А. А., Самарин А. М. Свойства расплавов железа. – М.: Наука, 1969. – 280 с.
11. Горушкина Л. П. Структура и свойства магниевых чугуна. – Харьков: Вища школа, 1980. – 160 с.
12. Соценко О. В. Агрегативный механизм формирования графита в ЧШГ. – М.: Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1990. – № 8. – С. 71–74.
13. Жуков А. А., Снежной Р. Л., Давыдов С. В. Об образовании компактного графита в чугуне // МиТОМ. – 1981. – № 9. – С. 21–25.
14. Жуков А. А. Фуллерены и сфероидизация графита в сплавах железа // МиТОМ. – 2000. – № 7. – С. 3–6.

15. Любченко А. П. Высокопрочные чугуны. – М.: Metallurgiya, 1982. – 120 с.
16. Могилевцев О. А. О механизме образования шаровидного графита в чугуне // Сборник научных трудов ДГТУ, серия Metallurgiya. – Днепродзержинск: ДГТУ, 1998. – С. 21–24.
17. Могилевцев О. А. Роль пузырей модификатора в образовании зародышей шаровидного графита в чугуне // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 4. – С. 31–33.
18. Зауличный Я. В., Петровская С. С., Гайворонская Е. А., Солонин Ю. М. Углеродные наноматериалы: электронное строение и процессы структурообразования. – К.: Наукова думка, 2012. – 277 с.



## REFERENCES

1. Gorshkov A. A., Voloshchenko M. V., Dubrov V. V., Kramarenko O. Yu. (1961). Spravochnik po izgotovleniiu otlivok iz vysokoprochnogo chuguna [*Handbook on the manufacture of castings from high-strength cast iron*]. Moscow-Kiev: Mashgiz, 300 p. [in Russian].
2. Stefaniuk S. L. (1985). Metallurgiiia magniia i drugikh legkikh metallov: uchebnik dlia tekhnikumov [*Metallurgy of magnesium and other light metals: textbook for technical schools*]. Moscow: Metallurgiiia, 200 p. [in Russian].
3. Knuniants I. L. (Ed.) (1990). Khimicheskaia entsiklopediia: V 5 t.: t. 2 [*Chemical encyclopedia: In 5 volumes; vol. 2*]. Moscow: Sov. entsikl., 671 p. [in Russian].
4. Mogilevtsev O. A., Storozhenko S. A., Storozhenko T. I. (2016). Khimicheskie protsessy pri modifitsirovanii chuguna vduvaniem magniia [*Chemical processes when modifying cast iron by injection of magnesium*]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 8-10, pp. 9–13 [in Russian].
5. Chubin K. I. (2008). Rozvytok teorii ta udoskonalennia tekhnologii desulfuratsii chavunu vduvanniam dispergovanogo magniiu: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [*Development of the theory and technology of pig iron desulphurisation by injecting dispersed magnesium*]. Extended abstract of candidate's thesis. Dneprodzerzhinsk, 40 p. [in Ukrainian].
6. Bunin K. P., Taran-Zhovnir Yu. N., Chernovol A. V. (1955). Chugun s sharovidnym grafitom [*Cast iron with globular graphite*]. Kiev: AN USSR, 97 p. [in Russian].
7. Stepin P. I. (1952). Issledovanie pervichnykh strukturnykh obrazovaniy v chugune [*Investigation of primary structural formations in cast iron*]. Liteinoe proizvodstvo, no. 5, pp. 13–19 [in Russian].
8. Mil'man B. S. (1949). Sverhprochnyi chugun so sferoidal'nym grafitom v litoi strukture [*Heavy cast iron with spheroidal graphite in cast structure*]. Vestnik mashinostroeniia, no. 12, pp. 30–42 [in Russian].
9. Girshovich N. G. (1966). Kristallizatsiia i svoistva chuguna v otlivkah [*Crystallization and properties of cast iron in castings*]. Moscow-Leningrad: Mashinostroenie, 564 p. [in Russian].
10. Vertman A. A., Samarin A. M. (1969). Svoistva rasplavov zheleza [*Properties of iron melts*]. Moscow: Nauka, 280 p. [in Russian].
11. Gorushkina L. P. (1980). Struktura i svoistva magnievogo chuguna [*Structure and properties of magnesium cast iron*]. Kharkov: Vyscha shkola, 160 p. [in Russian].
12. Sotsenko O. V. (1990). Agregativnyi mekhanizm formirovaniia grafita v CHSHG [*Aggregative mechanism of graphite formation in the nodular cast iron*]. Izv.VUZov. Chernaia metallurgiiia, no. 8, pp. 71–74 [in Russian].
13. Zhukov A. A., Snezhnoi R. L., Davydov S. V. (1981). Ob obrazovanii kompaktnogo grafita v chugune [*On the formation of compact graphite in cast iron*]. MiTOM, no. 9, pp. 21–25 [in Russian].
14. Zhukov A. A. (2000). Fullereny i sferoidizatsiia grafita v splavakh zheleza [*Fullerenes and spheroidization of graphite in iron alloys*]. MiTOM, no. 7, pp. 3–6 [in Russian].
15. Liubchenko A. P. (1982). Vysokoprochnye чугуны [*High-strength cast irons*]. Moscow: Metallurgiiia, 120 p. [in Russian].
16. Mogilevtsev O. A. (1998). O mekhanizme obrazovaniia sharovidnogo grafita v chugune [*On the mechanism of the formation of globular graphite in cast iron*]. Sbornik nauchnykh trudov DGTU, seriia Metallurgiiia, Dneprodzerzhinsk: DGTU, pp. 21–24 [in Russian].
17. Mogilevtsev O. A. (1999). Rol' puzyrei modifikatora v obrazovanii zarodyshei sharovidnogo grafita v chugune [*The role of modifier bubbles in the formation of nucleating graphite agent in cast iron*]. Teoriia i praktika metallurgii, no. 4, pp. 31–33 [in Russian].
18. Zaulichnyi Ya. V., Petrovskaia S. S., Gaivoronskaia E. A., Solonin Yu. M. (2012). Uglernodnye nanomaterialy: elektronnoe stroenie i protsessy strukturoobrazovaniia [*Carbon nanomaterials: electronic structure and processes of structure formation*]. Kiev: Naukova dumka, 277 p. [in Russian].

---

**Анотація**

*Могілевцев О. О., Стороженко С. А., Златоустов А. В.*  
Процеси модифікування чавуну магнієм

Жодна з існуючих теорій утворення кулястого графіту в магнієвому чавуні не може повністю пояснити всіх явищ, які спостерігаються на практиці. Запропонована авторами гіпотеза, заснована на конденсації дрібних бульбашок магнію при охолодженні рідкого чавуну, пояснює не тільки форму включень кулястого графіту, а й інші факти, наприклад, відсутність ефекту модифікування, якщо при введенні магнію бульбашки не утворюються.

---

**Ключові слова**

Магнієвий чавун, бульбашки, конденсація парів магнію, модифікування, сфероїдизація графіту, тиск, температура.

---

**Summary**

*Mogilevtsev O., Storozhenko S., Zlatoustov A.*  
Processes of modifying of cast-iron by magnesium

None of the existing theories of the formation of spheroidal graphite in magnesium cast-iron can fully explain all phenomena that are observed in practice. The hypothesis proposed by the authors based on the condensation of small bubbles of magnesium at cooling of liquid cast-iron explains not only the form of inclusions of spheroidal graphite, but also other facts, for example, the absence of modifying effect, if bubbles are not formed during the introduction of magnesium.

---

**Keywords**

Magnesium cast-iron, bubbles, condensation of magnesium vapor, modification, spheroidization of graphite, pressure, temperature.

Поступила 15.12.17