

## ОСОБЕННОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЧУГУНА ДИСПЕРГИРОВАННЫМ МАГНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОГРУЖНОЙ ФУРМЫ

*Днепродзержинский государственный технический университет*

Наведено результати високотемпературних експериментів з відпрацювання технології передсфероїдируючої та сфероїдируючої обробки чавуну подаванням диспергованого магнію.

Представлены результаты высокотемпературных экспериментов по отработке технологии предсфероидизирующей и сфероидизирующей обработки чугуна подачей диспергированного магния.

*Введение.* Недостаточный объем производства качественных модификаторов и низкосернистых чугунов замедляет развитие массового производства изделий из чугуна с шаровидным графитом. Магний является одним из модификаторов, обеспечивающих получение в чугуне шаровидного графита правильной формы.

В то же время, опыт модифицирующей обработки доменных чугунов магнийсодержащими модификаторами показал [1], что технология требует дополнительных дорогостоящих и трудоемких операций по перегреву расплава. Введение магния связано с определенными трудностями, сопровождающимися брызгообразованием, выбросами металла из ковша, значительным выделением дыма и, в конечном итоге, нестабильностью механических и пластических свойств получаемого чугуна, а также невысокой степенью усвоения магния.

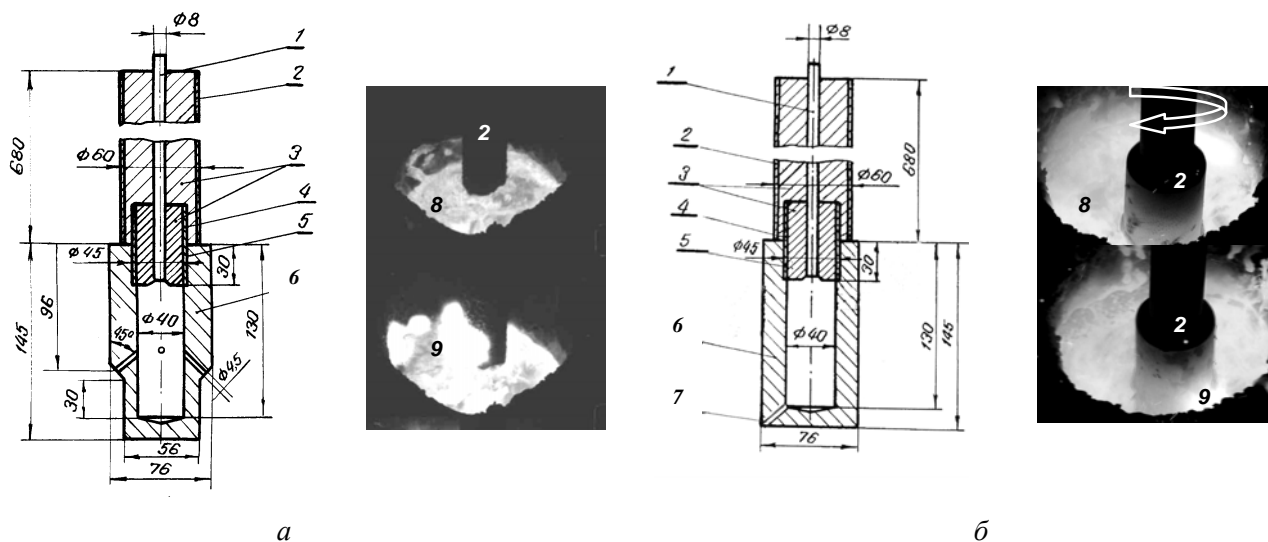
Высокая степень усвоения магния, при значительном снижении его удельного расхода, в сравнении с различными методами ввода чушкового магния, применения автоклавов герметизированных ковшей, магнийсодержащих лигатур, может быть получена при подаче диспергированного магния в расплав через фурму с открытым с торца испарителем [2]. Обеспечить более спокойный характер обработки расплава чугуна с повышением удельного расхода магния при одновременном сокращении продолжительности удалось при использовании погружных фурм, вращающихся вокруг вертикальной оси [3]. Рассредоточение пузырей вдуваемого магния при вращении фурмы в объеме ванны, по-видимому, позволит более эффективно осуществлять как предсфероидизирующую (десульфурацию, гомогенизацию), так и сфероидизирующую обработку чугуна, особенно в ковшах малой емкости.

Независимо от способа обработки магнием, при снижении концентрации серы в расплаве менее 0,010 %, происходит увеличение содержания остаточного магния в чугуне до концентрации 0,02...0,03 %, необходимой для модифицирующего эффекта.

*Постановка задачи.* Задачей исследования является изучение влияния способа ввода диспергированного магния на интенсивность процессов десульфурации чугуна и сфероидизации графита с целью отработки технологии получения высокопрочного чугуна в ковшах малой емкости с использованием вращающихся погружных фурм.

*Методика исследований.* В серии экспериментов на установке высокотемпературного моделирования по методике [3] в тигле индукционной печи ИСТ-0,16 осуществляли обработку расплава передельного чугуна вдуванием диспергированного магния в потоке аргона через сопла стационарной и вращающейся вокруг вертикальной оси погружных фурм.

В первой серии экспериментов в индукционной печи обработку расплава чугуна массой 100...130 кг (с начальной температурой 1370...1390 °С), содержащего 4,05...4,15 % С; 0,09...0,15 % Мп; 0,65...0,90 % Si; 0,050...0,080 % S и 0,045...0,065 % Р осуществляли диспергированным магнием МГП-99 (фракция 0,63...1,0 мм), подаваемым через четыре сопла стационарной фурмы с испарителем закрытого типа на торце (рис. 1,а), с удельным расходом 0,055...0,060 кг/мин на тонну чугуна, в потоке аргона интенсивностью ( $J_{Ar}$ ) 0,015...0,017 м<sup>3</sup>/(т·мин).



а - закрытый с торца испаритель с четырьмя соплами; б - закрытый с торца испаритель вращающейся фурмы с одним соплом под углом 45° к вертикальной оси фурмы:

- 1 - стальная трубка подвода диспергированного магния в потоке аргона;
- 2 - наружный графитовый чехол; 3 - высокоглиноземистая огнеупорная набивка;
- 4 - графитовая втулка; 5 - резьбовое соединение; 6 - графитовые испарители;
- 7 - сопла в торцевой части испарителя; 8 - поверхность расплава;
- 9 - выход паров неусвоенного магния

**Рисунок 1** – Конструкции и видеофрагменты обработки расплава с использованием стационарной (а) и вращающейся (б) погружных фурм

В следующей сравнительной серии экспериментов при сопоставимых начальных условиях вдувание диспергированного магния с удельной интенсивностью 0,041...0,080 кг/мин на тонну чугуна в потоке аргона интенсивностью 0,015...0,022 м<sup>3</sup>/(т·мин) проводили через односопловую конструкцию погружной фурмы (рис. 1,б), вращающейся вокруг вертикальной оси. Скорость вращения фурмы изменяли в пределах 20...180 об/мин.

По ходу обработки через определенные интервалы времени (1...3 мин) проводили отбор проб чугуна для последующего химического и петрографического анализа. По окончании обработки обеспечивали конечное содержание серы в чугуне 0,003...0,004 % и растворенного магния 0,026...0,032 % (табл. 1). При этом отношение  $Mg_{ocm}/S_{ocm}$  в чугуне находилось в пределах 6,1...8,6, что приводило к стабильному образованию шаровидного графита.

**Результаты работы.** Конструкции погружных фурм (рис. 1) обеспечивали, в сопоставимых условиях вдувания магния, различный ход обработки расплава с точки зрения уровня всплесков и брызгообразования, выхода на поверхность и догорания паров неусвоенного реагента. Несмотря на наличие четырех сопел (рис. 1,а), предназначенных обеспечить спокойный характер обработки, последний наблюдали только в

начальный период (25...30 % от общего времени продувки). По мере снижения температуры чугуна поведение ванны изменилось в сторону периодических, а при достижении температуры менее 1280 °С (при содержании серы в чугуне менее 0,01 %), постоянных выбросов расплава за пределы тигля.

**Таблица 1** – Структура образцов чугуна, рафинированного диспергированным магнием

Параметр	Оценка микроструктуры чугуна в соответствии с ГОСТ 3443-87							
	Номер пробы							
	1, 1', 3'	3	4	4'	5	5'	6	6'
время отбора пробы, мин	3	8	11	12	13	18	15	20
S, %	0,043	0,014	0,009	0,018	0,004	0,005	0,003	0,003
Mg, %	0,006	0,008	0,012	0,007	0,025	0,018	0,032	0,026
Форма графита	пластинчатый, гнездобразной и завихренной (1) формы	точечный графит и завихренной формы в виде единичных участков	вермикулярный и шаровидный графит неправильной формы	пластинчатый, гнездобразной формы	шаровидный правильной и неправильной формы	шаровидный. Участки вермикулярного и точечного графита	шаровидный правильной и компактной формы	шаровидный правильной и неправильной формы
Распределение графита	в виде колоний и междендритных выделений	в виде междендритных колоний	в виде изолированных включений	в виде колоний междендритного и точечного графита	равномерное	равномерное	равномерное	равномерное
Размер графита, мкм	30...120 15-30 (3')	< 15	< 15...30	15 и менее	15...30 ед. до 60	< 15...30	40...60	10...40
Площадь, занятая графитом, %	> 12	> 12	< 3	> 12	< 3	< 3	< 3	< 3
Тип металлической основы	перлитная с разорванной цементитной сеткой	перлит и вторичный цементит	структура ледебурита	перлит и вторичный цементит	структура ледебурита	структура ледебурита	структура ледебурита	структура ледебурита
Площадь перлита, %	около 98 (80 для 3')	30...60	-	-	-	-	-	-
Дисперсность перлита, мкм	< 0,3	0,3...0,8	-	0,3...1,3	-	-	-	-

С переходом к использованию вращающейся фурмы (рис. 1,б), особенно при скорости ее вращения в пределах 100...120 об/мин, удалось обеспечить спокойный характер обработки расплава. Прежде всего, удалось организовать обработку чугуна с существенно уменьшенным, в сравнении со стационарной фурмой, выходом неусвоенных паров магния на поверхность ванны, с незначительными редкими проявлениями пироэффекта, проявляющимися по мере снижения температуры чугуна с 1390 до 1280 °С и содержании серы в расплаве менее 0,01 %. Рассредоточение пузырей магния при вращении сопла фурмы, по-видимому, обеспечивает уменьшение их диамет-

ра с соответствующим повышением межфазной поверхности, переходом к неустойчивому состоянию и конденсацией в капли жидкого магния. При адсорбции на поверхности пузырька моноатомного слоя углерода, капля, в соответствии с работой [4], оказывается окруженной слоем графита. Такое включение может служить зародышем шаровидного графита.

Микроструктуру проб чугуна, отобранных из расплава по ходу обработки вдуванием магния через сопла стационарной (рис. 1,а) (образцы № 1'-6') и вращающейся (рис. 1,б) фурм (образцы № 1-6), изучали и фотографировали на шлифах до и после травления 4 %-ым раствором азотной кислоты с использованием оптического микроскопа МИМ-7 при различных увеличениях. Микроструктура исследованных образцов приведена на рис. 2.

По результатам химического анализа установлено, что содержание углерода, кремния, марганца и фосфора в сравниваемых образцах находится на одном уровне в пределах погрешности анализа. В то же время в сравниваемых образцах существенно отличаются текущие концентрации серы и остаточного магния в сходные моменты времени обработки (табл. 1).

Динамику изменения количества введенного ( $Mg_{вв}$ ), усвоенного ( $Mg_{усв}$ ) и свободного магния ( $Mg_{св}$ ), а также не связанной серы  $S_{св}$  оценивали по выражениям, приведенным в работе [5]. Количество  $Mg_{усв}$  определяли как сумму  $Mg_{ост}$  и  $Mg$ , израсходованного на связывание  $[S]$ :

$$Mg_{усв} = Mg_{ост} + 0,76 \cdot ([S]_{нач} - [S]) . \quad (1)$$

Установлено, что количество  $Mg_{усв}$  изменяется практически по линейному закону, что свидетельствует о постоянстве степени усвоения магния

$$\eta = \left( \frac{Mg_{усв}}{Mg_{вв}} \right) \cdot 100 \% . \quad (2)$$

При этом степень усвоения магния для стационарной фурмы (рис. 1,а) составила 33...37 % на протяжении основного времени обработки при постоянной интенсивности ввода магния. Для вращающейся фурмы (рис. 1,б), при сопоставимой интенсивности подачи магния, степень его усвоения составила 40,2...43,6 %.

Предполагая, что скорость взаимодействия введенного магния с растворенной в чугуне серой достаточно высока, содержание  $S_{св}$  определяли по выражению

$$S_{св} = S - \frac{Mg}{0,76}, \quad S_{св} \geq 0, \quad (3)$$

а содержание  $Mg_{св}$  как

$$Mg_{св} = Mg_{ост} = 0,76 \cdot S, \quad Mg_{св} \geq 0 . \quad (4)$$

Установлено, что после связывания  $S_{св}$  накопление остаточного магния происходит почти по линейному закону. Необходимо отметить, что при сходном характере изменения содержания серы по ходу обработки при использовании вращающейся фурмы (рис. 1,б) десульфурация чугуна протекает с опережением на 2...4 мин в сравнении со стационарной (рис. 1,а).

Сфероидизирующее действие магния на графит проявляется при  $Mg_{ост}$  свыше 0,010 % (табл. 1). При  $Mg_{ост}$  более 0,015 % сфероидизирующий эффект усиливается и образуется вермикулярный графит, растущий из шаровидных зародышей. В зависи-

мости от количества  $Mg_{осм}$  включения графита в чугуна изменяют свою форму следующим образом.

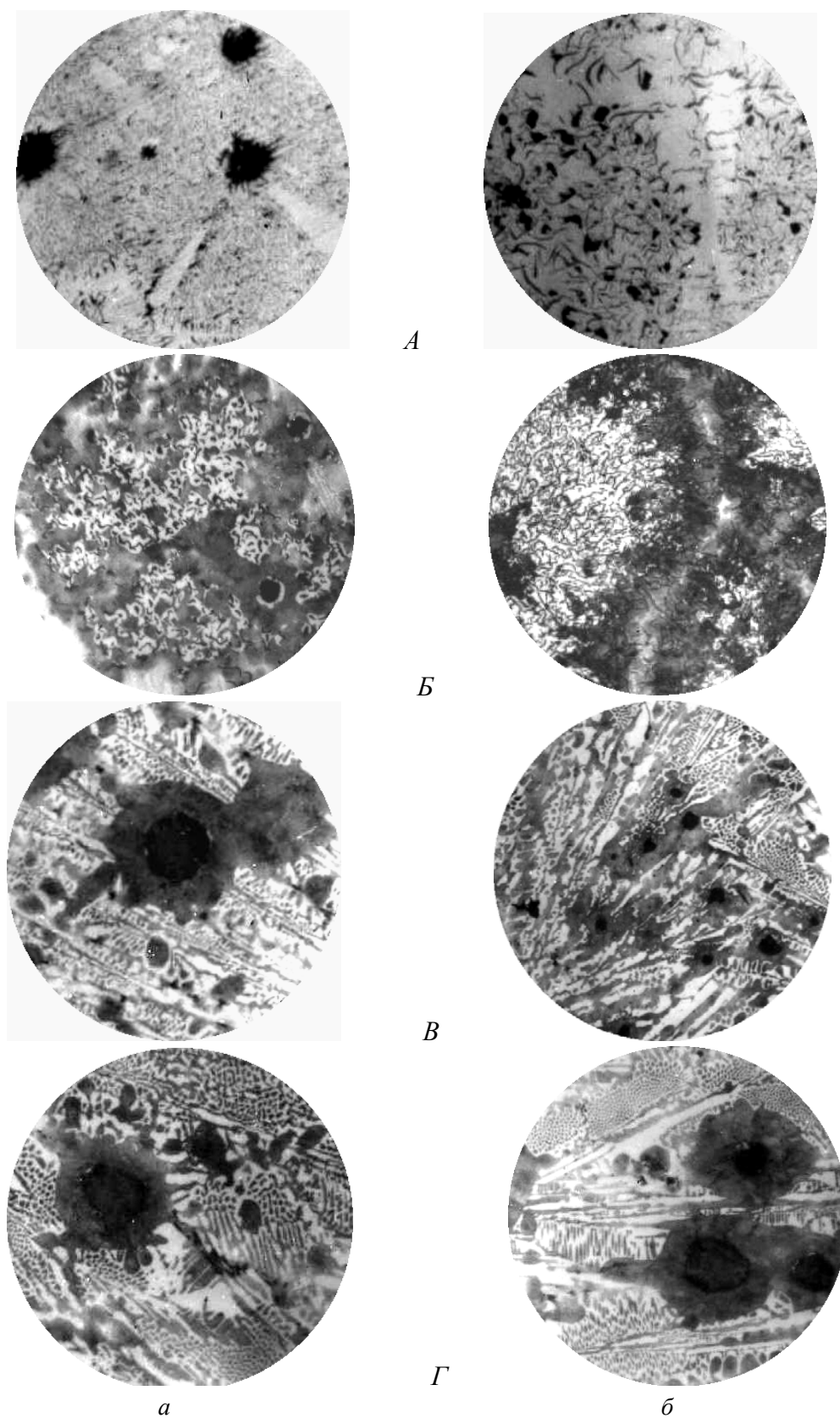
Микроструктура образца № 1 однородная по всему сечению, кроме центральной области диаметром 5...6 мм (табл. 1). Основная структура – пластинчатый графит (длиной 100...200 мкм). Металлическая основа перлитная, по границам эвтектических колоний – разорванная сетка цементита. Внутри зерен видны выделения вторичного цементита. Количество цементита повышается по направлению к центру. Размер колоний порядка 500...1000 мкм. В центральной зоне наблюдается обратный отбел, шаровидные эвтектические графитно-аустенитные колонии, окруженные мелкосотовым ледебуридом. Присутствуют отдельные дендриты первичного аустенита. Графитные включения в этой зоне несколько мельче (до 100 мкм). Микроструктуры образцов № 1' и № 2' подобны образцу № 1, но графитные пластины несколько крупнее (до 300 мкм). Обратный отбел менее выражен, диаметр зоны отбела несколько больше (до 10 мм).

Микроструктура образца № 2 подобна образцу № 1, однако длина пластин графита и размер эвтектических колоний несколько меньше (50...100 и 300...500 мкм соответственно), а форма графитовых пластин более завихренная.

Микроструктуры образцов № 3 и № 3', отобранных в основной период десульфурации, сходны между собой (рис. 2,А), однако существенно отличаются от описанных выше. Графит распределен в виде тонко дифференцированных эвтектических колоний («междендритный» диаметром 500 мкм), в центре колоний и на их периферии степень дифференциации графита меньше (рис. 2,А-а). Эвтектические колонии имеют компактное графитное ядро, от центра которого отходят пластины тонко дифференцированного графита. Феррит сосредоточен в зоне тонко дифференцированного графита, по границам колоний дифференциация графита меньше. В поверхностной зоне шлифа, толщиной до 5 мм, дифференциация графита увеличивается и растет количество феррита у самой поверхности (до 80...100 %). Наблюдаются отдельные ветви дендритов аустенита, имеющие по краю структуру перлита и феррита.

В то же время, в образце № 3' сохраняется микроструктура, подобная образцу № 2, но размер эвтектических колоний значительно меньше (200...500 мкм), а степень дифференциации графита несколько выше (рис. 2,А-б). Присутствует незначительный обратный отбел.

В основе микроструктуры образца № 4 – ледебурид сотового типа, дендриты аустенита (рис. 2,Б-а). Наблюдаются включения графита компактной и вермикулярной формы диаметром 15...30 мкм, окруженные тонкой разорванной каймой феррита и несколько более широкой каймой перлита, структурно связанного с ледебуридом металлической основой. На поверхности образца присутствует тонкая (до 1,0 мм) кромка, имеющая ферритную структуру с тонко дифференцированным графитом. Граница между кромкой и ледебуридом – в виде перлитной каймы с отдельными включениями компактного и вермикулярного графита в ферритной оторочке. В центральной части – отдельные колонии вермикулярного графита в ферритно-перлитной основе, феррит расположен вокруг включений графита. В центре колоний появляются шаровидные включения графита, вокруг него область шириной от 50 до 100 мкм, свободная от графита, затем периферия колоний со структурой вермикулярного графита. На периферии вермикулярный графит встречается реже. Из-за большого начального переохлаждения образуется шаровидный графит в аустенитной оболочке. С уменьшением переохлаждения в расплаве образуются колонии вермикулярного графита.



**Рисунок 2** – Микроструктура образцов (табл. 1), отобранных на 8-й и 9-й мин обработки (А); 11-й и 12-й (Б); 13-й и 18-й (В); 14-й и 20-й мин (Г) соответственно с использованием вращающейся (а) и стационарной (б) фурмы (периферия, после травления)

Микроструктура образца № 4' (рис. 2,Б-б) подобна образцу № 3, однако содержит значительно больше перлита (60...80 %), расположенного по границам колоний. На периферии колоний пластины утолщаются, переходя в обычный пластинчатый графит. В то же время, компактных включений в центре колоний нет, в отличие от образца № 3. Графит расположен гнездообразно, колониями. Дендриты первичного аустенита отсутствуют.

Микроструктура образца № 5 (рис. 2,В-а) подобна образцу № 4', но отличается включениями графита правильной формы размером до 50...60 мкм, тонкой перлитной оторочкой (до 50 мкм), и небольшим количеством включений (до 3 мм<sup>-2</sup>). Имеются дендриты первичного аустенита. Образец № 5', отобранный на 5 мин позже, чем образец № 5, имеет структуру, аналогичную последнему при несколько большем количестве включений графита меньшего размера (диаметр до 40 мкм) и наличии вермикулярного графита (рис. 2,В-б). Количество включений по направлению к центру растет с увеличением доли вермикулярного графита.

Образцы № 6 и № 6' отобраны из расплава через 2 мин после окончания обработки и имеют сходную структуру (рис. 1,Г). В то же время, в первом случае (№ 6) (рис. 2,Г-а) включения шаровидного графита крупнее (до 60 мкм), они расположены в виде отдельных скоплений, особенно в центральной части образца. В образце № 6' размер шаровидного графита, в основном, несколько меньше (от 10 до 40 мкм) (рис. 2,Г-б).

В целом, можно отметить, что в связи с равными условиями охлаждения образцов изменения структуры чугуна определяются, в первую очередь, остаточным содержанием серы и магния. При весьма низком содержании  $S_{св}$  происходит резкое изменение, прежде всего, строения эвтектического графита и он приобретает вид тонко дифференцированных колоний. Металлическая основа становится в основном ферритной, что объясняется малым расстоянием между пластинами графита и, как следствие, уменьшением пути диффузии углерода к графиту в процессе эвтектоидного превращения. По-видимому, при десульфурации чугун кристаллизуется со значительным переохлаждением, в результате чего уменьшается количество центров графитизации.

В образцах, содержащих незначительное количество (0,005...0,006 %) свободного магния, при весьма низком содержании серы (менее 0,009 %), наблюдается существенное изменение микроструктуры: основная масса чугуна кристаллизуется по метастабильной системе, что свидетельствует о еще большем переохлаждении расплава. При этом в структуре наблюдаются отдельные зерна графита компактной формы. Структура серого чугуна сохраняется только в тонкой поверхностной корочке и в центральной зоне образцов, где скорость охлаждения несколько меньше. При дальнейшем увеличении содержания свободного магния структура образцов практически не изменяется, только исчезают зоны с междендритным графитом, форма включений шаровидного графита становится более правильной, их размеры несколько увеличиваются, а количество – сокращается.

Описанные изменения микроструктуры не зависят от типа использованной для ввода магния погружной фурмы (рис. 1), а определяются только текущим содержанием  $S_{св}$  и  $Mg_{св}$ , что согласуется с предположением [5] о степени чистоты чугуна по примесям, в первую очередь по сере, как решающем факторе в процессе сфероидиза-

ции графита. Вращение фурмы вокруг вертикальной оси приводит к улучшению расщепления вдуваемого магния по объему расплава, повышению скорости удаления серы и обеспечивает интенсификацию формирования шаровидного графита при более спокойном характере обработки. При таком способе ввода магния шаровидный и компактный графит преобладает уже при 0,012 %  $Mg_{ост}$ , тогда как обычно для этого необходимо 0,02...0,03 %  $Mg_{ост}$ .

*Выводы.* Показана эффективность предсфероидизирующей и сфероидизирующей обработки чугуна диспергированным магнием с использованием вращающейся погружной фурмы. При вводе магния через сопло вращающейся со скоростью 100...120 об/мин (в исследованных условиях) погружной фурмы шаровидный и компактный графит преобладает при значительно меньшем содержании  $Mg_{ост}$ , чем обычно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давыдов, С. В.* Технология наномодифицирования доменных и ваграночных чугунов [Текст] / С. В. Давыдов // Заготовительное производство. – 2005. – № 2. – С. 3-9.
2. Доменный чугун с шаровидным графитом для крупных отливок [Текст] / *А. М. Зборщик, В. А. Курганов, Ю. Б. Бычков* и др. – М. : Машиностроение, 1995. – 128 с. – Библиогр. : с. 126-127.
3. Высокотемпературное и численное моделирование десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния через погружную вращающуюся фурму [Текст] / *Е. Н. Сигарев, А. Г. Чернятевич, К. И. Чубин* и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 6. – С. 60-65.
4. *Могилевцев, О. А.* Влияние пузырей магния на сфероидизацию графита в чугуне [Текст] / О. А. Могилевцев // Металл и литье Украины. – 2000. – № 9-10. – С. 30-31.
5. *Сигарев, Е. Н.* Численное исследование гидрогазодинамики ванны при ковшевой обработке чугуна [Текст] / Е. Н. Сигарев // Современная металлургия начала нового тысячелетия : сборник научных трудов. – Липецк. – 2001. – Ч. 1. – С. 40-44.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2012 р.

Рецензент, проф. О.В. Гресс