

УДК 621.74.669.131.6

С. П. Королев, В. М. Королев (ОНИЛлит БНТУ, г. Минск)

## Практика производства отливок из чугуна с вермикулярным графитом

Недостаточная изученность процессов плавки, внепечной обработки и структурообразования чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) объясняет низкий уровень объемов его производства. Технология производства отливок из ЧВГ должна гарантировать стабильное получение требуемой структуры. Известные классические способы получения отливок из ЧВГ, основанные на немодифицировании чугуна сфероидизаторами (в основном, магнием [1]), обладают устойчивостью ввиду чрезвычайно узких пределов остаточного содержания магния (0,015...0,025%). Малые присадки вермикуляризатора в исходный расплав ведут к образованию пластинчатых включений графита, что чревато резким снижением прочностных свойств, напротив, повышенные — к сфероидизации графитных включений и появлению дефектов усадочного происхождения в отливках.

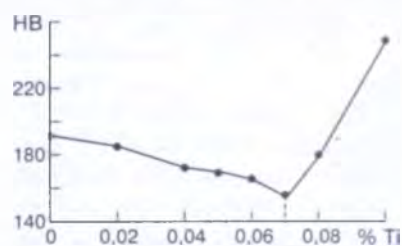
В работе была поставлена задача — на основании изучения влияния индивидуальных РЗМ и щелочно-земельных металлов (ЩЗМ) в сочетании с рядом других элементов IV гр. таблицы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева разработать химсоставы комплексных модификаторов, которые бы позволили расширить область устойчивого формирования вермикулярного графита (ВГ) и создать технологию стабильного производства отливок из ЧВГ.

Большинство химсоставов модификаторов, используемых в производстве отливок из ЧВГ, содержат один или несколько деглобу-

ляризаторов [2]. Хотя механизм влияния этих элементов на графитообразование в достаточной мере не изучен, однако замечено, что присутствие титана в расплаве расширяет область кристаллизации ВГ в магниевом чугуне. Румынские исследователи [3] разделяют элементы-деглобуляризаторы на три группы. Группа I — это элементы антисфероидизаторы: Zn, Cd, Hg, Al, Sn, Pb, As, Sb, Bi. К группе II принадлежат косвенные антисфероидизаторы: Ti, Zr, Hf. В группу III входят антисфероидизаторы общего действия: O, S и др., находящиеся в шестой группе Периодической системы элементов. Вместе с тем, в литературе отсутствуют научно обоснованные сведения об оптимальных соотношениях сфероидизирующих и десфероидизирующих элементов для стабильного получения ВГ в чугунах.

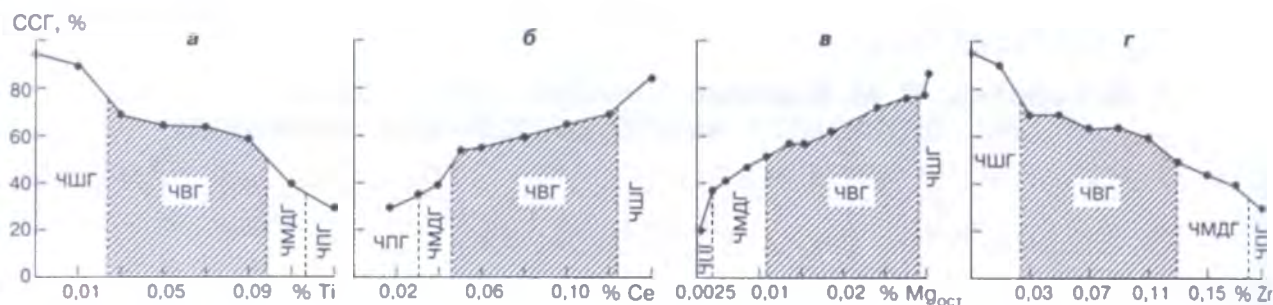
Для установления закономерностей взаимного влияния отдельных сфероидизаторов исследовали их действие на формообразование графита в синтетических Fe-C-Si сплавах. В качестве шихтовых материалов использовали материалы высокой чистоты: карбонильное железо марки ВЗ, реакторный графит, полупроводниковый кремний марки КДБ-0,045, химически чистые Mg, Ce, Ti, Zr. Технология производства реакторного графита, полупроводникового кремния и активных добавок обеспечивала достаточную чистоту составляющих шихты. Во избежание насыщения сплава газами и угара его компонентов нагрев и расплавление образцов осуществлялось в атмосфере аргона марки А.

Для исследования влияния титана на формирование графитной фазы в высокоуглеродистых сплавах железа его вводили в синтетические сплавы Fe-C-Si эвтектического состава в количествах 0,01...0,50%. Результаты исследований показали, что добавки 0,01...0,07% Ti активизируют процесс зарождения графитной фазы при кристаллизации синтетического Fe-C-Si-сплава. Последнее связано, вероятно, с образованием нитридов и карбонитридов титана, играющих роль активных подложек для кристаллизации графита. С увеличением концентрации титана сверх 0,07% проявляется его карбидообразующее действие, повышается склонность сплава к переохлаждению, доля цементитной эвтектики в структуре чугуна резко возрастает и при 0,5% Ti достигает 80% (рис. 1).



▲ Рис. 1. Влияние титана на твердость синтетического Fe-C-Si-сплава

Для изучения совместного влияния де- и сфероидизаторов на формообразование графита в синтетический сплав Fe-C-Si вводили церий и титан. Количество церия выбирали достаточным для формирования  $\geq 50\%$  шаровидных включений от числа всех включений графита на площади шлифа (0,12% к массе навески



▲ Рис. 2. Влияние на ССГ: а — присадки титана в Fe–C–Si-сплав, обработанный 12% Се; б — добавок церия в присутствии 0,03% Ti; в — добавок магния в присутствии 0,03% Ti; г — присадки циркония в сплав, обработанный 0,12% Се

Fe–C–Si-сплава). Возрастающие присадки титана закономерно снижали степень сфероидизации графита, то есть форма графитных включений изменялась от шаровидной (ШГф4) к вермикулярной (ВГф3, ВГф2, ВГф1), далее — к колониям графита переохлажденной эвтектики и затем к крупнопластинчатому образованию (рис. 2, а).

Титан, введенный совместно с церием, расширяет концентрационный интервал образования ВГ в синтетическом чугуна в сравнении с присадкой чистого церия. Добавки чистого церия в синтетический Fe–C–Si-сплав способствуют кристаллизации графита вермикулярной формы в пределах 0,02...0,09%. При наличии 0,03% Ti интервал образования ВГ несколько расширяется, смещаясь в сторону больших добавок церия (рис. 2, б) и составляет 0,05...0,13%. Смещение интервала ВГ в сторону больших концентраций можно объяснить взаимодействием титана с углеродом. Связывая часть углерода, титан препятствует формированию графитных включений вермикулярной формы при небольших концентрациях церия.

Более заметное расширение интервала формообразования ВГ в синтетическом сплаве Fe–C–Si наблюдается при добавках титана к магнию. При добавках чистого магния в синтетический Fe–C–Si-сплав ВГ образуется в интервале 0,0084...0,016%. Дополнительное введение 0,03% Ti расширяет эти пределы до 0,011...0,029% (рис. 2, в). Смещение интервала кристаллиза-

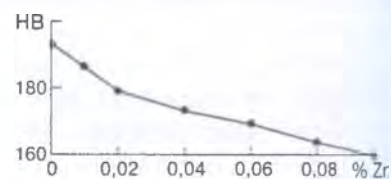
ции ВГ в сторону больших концентраций магния происходит, вероятно, в результате взаимодействия титана с компонентами сплава и изменения условий графитообразования.

В отличие от титана поведение циркония в чугуне неоднозначно. Следует отметить, что он характеризуется повышенным химическим сродством к сере и газам. Исследования показали, что влияние возрастающего количества циркония на степень сфероидизации графита (ССГ) в синтетическом сплаве Fe–C–Si эвтектического состава, предварительно обработанного церием (0,12% Се), аналогично действию титана. Из рис. 2, г видна тенденция десфероидизирующего действия циркония в цериевом синтетическом чугуне. Однако он способствует формированию более широкой зоны ВГ по сравнению с титаном — 0,02...0,13%.

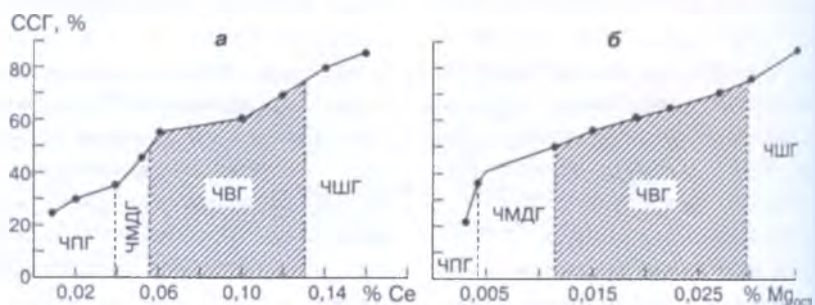
В синтетическом чугуне цирконий проявляет только графитизирующее воздействие, что подтверждается постепенным снижением твердости Fe–C–Si-сплава по мере увеличения содержания циркония в нем (рис. 3). В отсут-

ствии сфероидизирующих элементов цирконий не вызывает глобуляризации графита в синтетическом чугуне. Введенный совместно с церием, в количестве 0,03%, он изменяет зону вермикуляризации графита с 0,02...0,09 до 0,06...0,13% Се (рис. 4). Смещение интервала цериевого ЧВГ в сторону больших концентраций в синтетическом чугуне связано, вероятно, с теми же причинами, что и при добавлении Ti.

Цирконий значительно расширяет интервал формирования ВГ под воздействием магния (рис. 4, а) с 0,0084...0,016 до 0,011...0,030% Mg<sub>ост</sub>. Причем, аналогично титану, добавка 0,03% циркония к возрастающей присадке магния расширяет несколько зону графита переохлажденной эвтектики. Механизм десфероидизирующего действия цир-



▲ Рис. 3. Влияние циркония на твердость синтетического Fe–C–Si-сплава



▲ Рис. 4. Влияние на ССГ: а — добавок церия в присутствии 0,03% Zr; б — остаточных концентраций магния в присутствии 0,03% Zr



кония при добавке к церию схож с поведением титана, хотя на сегодня однозначно не объясним, и, вероятно, достаточно сложен.

*Полученные результаты изучения влияния циркония на форму графита при кристаллизации синтетического чугуна показали, что он проявляет десфероицизирующее действие на графитную фазу в присутствии сфероидизаторов. Самостоятельного вермикуляризирующего или сфероидизирующего влияния цирконий не оказывает.*

Из приведенных результатов следует, что исследование совместного влияния сфероидизирующих элементов (магния, церия), а также десфероицизаторов (титана, циркония) должно позволить обоснованно подойти к рациональному выбору состава комплексной лигатуры для стабильного получения ВГ в структуре чугуна. Поэтому были проведены серии экспериментов по изучению влияния комплексов Mg–Ce–Ti–Zr на формообразование графита в Fe–C–Si-сплавах, в которых концентрации рассматриваемых элементов изменялись от 0,01 до 0,10%. Анализ полученных результатов показал, что наиболее перспективная область оптимальных соотношений Mg и РЗМ (церия) в присутствии Ti и Zr, обеспечивающая более эффективную стабилизацию структуры ЧВГ при общем минимальном расходе присадок, принадлежит к категории низкомагниевого лигатур (3...5% Mg) и описывается соотношением:

$$(Zr + Ti) : Mg : \text{РЗМ} = 1 : (1 + 2) : (1,5 + 3).$$

*Результаты экспериментов на чистых материалах свидетельствуют о том, что формоизменения при кристаллизации графитной фазы происходят последовательно — от грубо пластинчатых включений к графиту переохлажденной эвтектики, затем ВГ и ШГ.*

Если рассмотреть крайние формы, то есть пластинчатую и шаровидную, то кристаллическое строение их включений различается существенно. При образовании пластинчатой формы подавляющее преимущество наращивания имеют призматические грани решетки графита (грани вдоль базиса плоскости), а для шаровидной формы рост идет за счет наслаивания базисных плоскостей. По мере увеличения присадки в жидкий чугун модификатора (сфероидизирующего элемента) постепенно повышается вероятность ускорения роста графита на перпендикулярно базисных плоскостях и замедления — вдоль базисных — на призматических. Это должно сказаться на строении графитных включений. Надо полагать, что при переходе к ВГ происходит поворот базисных плоскостей в графитном каркасе за счет большей концентрации сфероидизирующего элемента в данном микрообъеме кристаллизующегося расплава. На завершающем этапе кристаллизации эвтектики остатки жидкой фазы обогащаются модификатором (сфероидизирующим элементом), имеющим чрезвычайно низкую растворимость в графите

и аустените. Его концентрация достигает уровня, соответствующего образованию ШГ. Сфероидизация отдельных мест графитных каркасов в этих условиях осуществляется часто с появлением шаровидных образований, или изгибом всего каркаса так, чтобы базисные плоскости решетки графита располагались перпендикулярно притоку углерода из жидкого чугуна. Концентрация сфероидизатора может выходить на этот уровень и раньше (на какой-то период) в зависимости от колебаний степени насыщенности отдельных микрообъемов жидкой фазы модификатором, что находит подтверждение при изучении микроструктуры ЧВГ.

На основании проведенных исследований установлено, что для стабильного производства отливок из ЧВГ более рационально применять комплексные низкомагниевого модификаторы, содержащие десфероицизирующие элементы.

Однако наличие в химсоставе чугуна десфероицизаторов графита нежелательно, что и стало преградой в распространении этого чугуна из-за негативного остаточного действия титана, особенно при производстве в одном цехе отливок из ЧШГ и ЧВГ ввиду накопления титана в возврате.

Поэтому производство отливок из ЧВГ на базе модификаторов, содержащих сфероидизирующие и десфероицизирующие элементы, осуществимо только на отдельных специализированных участках, либо параллельно с производством отливок из серого чугуна, причем невысоких марок. При изготовлении отливок из СЧ 25 и СЧ 30 велика вероятность появления повышенной твердости из-за накопления в возврате титана.

Для решения этих проблем сотрудники кафедры "Металлургия литейных сплавов" и ОНИЛлита (БНТУ, г. Минск) провели исследования, которые позволили установить, что для создания стабильного техпроцесса получения ЧВГ необходимо иметь следующее:

- вермикуляризирующие модификаторы с низкой температурой плавления, высоким процентом усвоения, длительной "живучестью" (> 20 мин);
- номенклатуру отливок с прочностными характеристиками:  $300 \leq \sigma \leq 450$  МПа;  $1 \leq \delta \leq 4\%$ ;  $170 \leq \text{HB} \leq 250$ , высокими показателями термостойкости и приемлемыми технологическими свойствами;
- подтверждение экономической целесообразности перевода номенклатуры отливок с ЧПГ и ЧШГ на ЧВГ.

Из числа отливок, используемых в металлургическом производстве, в первую очередь, технически и экономически целесообразно производство из ЧВГ изложниц с учетом специфики техпроцесса, для которого характерны:

- низкая температура заливки форм (1200...1250°C);
- большая масса отливки ( $\geq 2$  т);
- большая толщина стенки отливки ( $\geq 100$  мм).

Это определило расчет необходимого химсостава комплексного модификатора, а также способ его изготовления. *Главное требование — такие модификаторы должны обладать устойчивым “вермикуляризирующим” эффектом.*

Исследования, проведенные на чистых Fe–C–Si-сплавах в среде аргона, позволили экспериментально найти оптимальное сочетание активных элементов-вермикуляризаторов магния и РЗМ (церия, иттрия, лантана, неодима, празеодима) для формирования ВГ в зависимости от содержания серы в исходном расплаве. Степень сфероидизации графита (ССГ) определяли по методике, разработанной В. И. Литовкой [4]. На рис. 4, б приведены зависимости остаточного содержания магния и РЗМ на ССГ в синтетическом Fe–C–Si-сплаве эвтектического состава ( $C_s = 4,3$ ), обработанном комплексными присадками “Mg + РЗМ”.

Для создания эффективного комплексного модификатора разработан способ изготовления быстроохлажденной структуры, так называемый “чипс-модификатор” на основе ферросилиция<sup>1</sup>. Организовала производство гаммы быстроохлажденных модификаторов различного назначения НПП “Технология”, г. Челябинск (ген. директор А. Я. Дынин, техн. директор Р. Г. Усманов, под научным руководством И. В. Рябчикова).

Быстроохлажденная структура комплексного модификатора позволяет ему усваиваться расплавом чугуна при более низких температурах (~1200°C), чем традиционные кусковые фракционные модификаторы типа ФСМг. *Сочетание большего количества естественно окисленных элементов (Mg + РЗМ) и элементов-стабилизаторов в составе комплексных быстроохлажденных “чипс-модификаторов” увеличило время “живучести”, то есть эффект вермикуляризирующей обработки до 25...30 мин.*

Эти преимущества “чипс-модификаторов” позволили стабилизировать технологию производства отливок из ЧВГ. В условиях чугунолитейного цеха ОАО “Чусовской металлургической завод” (Пермская обл.) разработан и освоен процесс производства глухонных сталеразливочных изложниц прямоугольного сечения из ЧВГ массой > 2,5 т и средней толщиной стенки 100 мм. В настоящее время осваивается технология изготовления изложниц для слитков железнодорожных колес в условиях чугунолитейного цеха ОАО “Выксунский металлургический завод” (Нижегородская обл.). Масса изложницы 5000 кг при толщине стенки 120 мм.

Совместно с ИТЦМ “Металлург”, г. Москва, (ген. директор Ф. И. Ковалев) и ОАО “КамАЗ” (главный металлург В. И. Сивко) разрабатывается

программа перевода ряда отливок двигательной группы с ЧПГ на ЧВГ, и в условиях ОАО “КамАЗ-Металлургия” изготовлены опытные отливки блока цилиндров и картерных отливок из ЧВГ. Подготовительные работы по изготовлению ряда отливок из ЧВГ ведутся по номенклатуре ОАО “Турбомоторный завод” (г. Екатеринбург).

Создание ряда быстроохлажденных “чипс-модификаторов” под торговой маркой VERMILOY-B (ТУ 14-5-248-01) совместно с НПП “Технология” позволило организовать производство отливок из ЧВГ различной массы, разных толщин стенок на базе ряда плавильных агрегатов: газовой вагранки (ОАО “ЧМЗ”), коксовой вагранки (ОАО “ВМЗ”), дуговой печи (ОАО “КамАЗ”), индукционной печи (ОАО “ТМЗ”).

Стабильные техпроцессы производства отливок из ЧВГ открывают новые перспективы для этого конструкционного материала в различных отраслях народного хозяйства. *Помимо расширения области устойчивого формирования ВГ в чугуне, предлагаемые технологии отличаются отсутствием пироэффекта и незначительным дымовыделением (ковшовая обработка), что позволяет достаточно органично вливаться в технологическую цепочку производства чугунных отливок практически в любом цехе.*

### Список литературы

1. **Лекаш С. Н.** Ресурсосберегающие технологии получения высококачественных чугунов для машиностроительных отливок. — Мн.: Навука и тэхніка, 1991. — 223 с., ил.
2. **Носов В. Н., Носова Л. М.** Эксплуатационные свойства чугуна с вермикулярным графитом // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. — 1983. — № 10. — С. 101–104.
3. **Софрони Л., Рипосан И., Хира И.** Некоторые соображения по кристаллизации чугунов, содержащих графит промежуточной формы (вермикулярного типа): Пер. с румын. — Бухарест: Политехн. ин-т, 1974.
4. **Литовка В. И.** Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. — Киев: Навукова Думка, 1987. — 206 с., ил.

*The aim of work is to produce complex inoculants that would allow expanding the area of stable formation of compacted vermicular graphite and create a process of stable production of CV graphite iron castings. Effect of rare-earth metals and alkaline-earth metals in combination with other chemical elements was investigated. Positive results under the conditions of leading industrial plants have been obtained.*

*Stable processes of manufacturing CV graphite iron castings open new prospects for the application of that structural material in various national economy branches.*

<sup>1</sup> **Авторы способа** производства “чипс-модификаторов”: Лекаш С. Н., Шейнерт В. А., Слуцкий А. Г., Бестужев Н. И., Михайловский В. М., Розум В. А. и другие сотрудники ОНИЛлит БНТУ.