

Д. А. Болдырев (Исследовательский центр ОАО «АВТОВАЗ»),  
С. В. Давыдов (Брянский государственный технический университет)

## Технология получения чугуна с вермикулярным графитом в отливках при внутриформенном модифицировании сплавами Fe-Si-PЗМ

Чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) является перспективным конструкционным материалом. В нем уникально сочетаются сбалансированные физико-химические свойства с технологическими и эксплуатационными характеристиками [1]. Особенности свойств ЧВГ обусловлены структурой графитных включений. В отличие от серого чугуна с пластинчатым графитом, в котором графитные пластины растут из одного центра и связаны друг с другом в пределах эвтектической колонии, каждая частица вермикулярного графита вырастает из отдельного центра [2]. При росте графитная частица приобретает вид червеобразных отростков, округлых в сечении. Такая форма частиц придает чугуну характеристики, занимающие промежуточное положение между серым и высокопрочным чугуном.

Получение ЧВГ при его модифицировании цериевым мишметаллом обеспечивает наиболее стабильные результаты, чем в случае магниевого процесса, что связано с меньшим сфероидизирующим действием Се, La и других РЗМ и может быть легко реализовано в производственных условиях. Преимущественно применяются РЗМ цериевой группы в виде комплексных сплавов с суммарным содержанием РЗМ от 25 до 97%. В результате высокой химической активности церия расход сплавов, содержащих РЗМ, для получения ЧВГ линейно зависит от содержания серы (до 0,16%) в ис-

ходном чугуне [3]. По сравнению с церием лантан проявляет большее сфероидизирующее (ЧВГ образуется при 0,046% La) и меньшее карбидообразующее действие: цементит образуется только при 0,075% La, в то время как аналогичное действие на структуру церий оказывает уже при 0,014%.

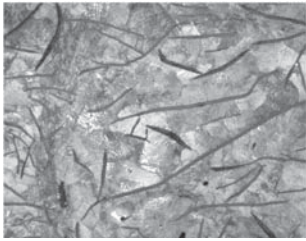
Мишметалл легко, без пироэффекта, дыма и выбросов растворяется в жидком чугуне, что его выгодно отличает от магниевых лигатур. При обработке чугуна цериевой лигатурой полученный ЧВГ характеризуется меньшей склонностью к образованию усадочных дефектов и менее чувствителен к охрупчиванию при 300–450°C [4]. Однако церий является элементом, тормозящим графитизацию чугуна. Введение уже 0,05% Се в синтетический чугун без вторичного графитизирующего модифицирования даже при небольших скоростях охлаждения (~ 10°C/мин) вызывает значительное переохлаждение расплава и приводит к кристаллизации по метастабильной диаграмме состояния [5].



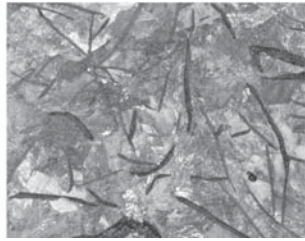
Рис. 1. Общий вид отливки детали «Вал распределительный» (1 и 8 – номера кулачков в направлении поступления металла)

### Микроструктура материала опытных отливок «Вал распределительный»

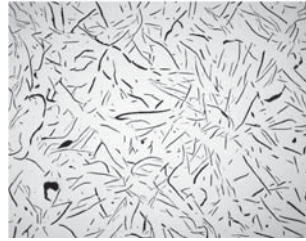
№ образца	Микроструктура	НВ <sub>5/750/10</sub>
1	1-й кулачок Графит пластинчатый типов А и Е №4. Металлическая основа – перлит пластинчатый	163 187
	8-й кулачок Графит пластинчатый типов А, В и Е №4. Металлическая основа – перлит пластинчатый	179 193–197
2	1-й кулачок Графит вермикулярный типов ВГф2, ВГф3. Металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 5%, цементита до 10%	239
	8-й кулачок Графит вермикулярный типов ВГф2, ВГф3, пластинчатый тип Е №7. Металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 7%, цементита до 15%	229
3	1-й кулачок Графит вермикулярный типов ВГф2, ВГф3. Металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 10%	239
	8-й кулачок Графит вермикулярный типов ВГф2, ВГф3. Металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита до 15%	239–244
Требования СТП 37.101.9778–2004	Графит вермикулярный ВГф2, ВГф3, графита шаровидного ШГф4, ШГф5 не более 20%, пластинчатого не более 15%. Допускается до 70% шаровидного графита ШГф4, ШГф5 при размере включений не более ШГд25. Металлическая основа – перлит пластинчатый, феррита не более 20%.	210–285



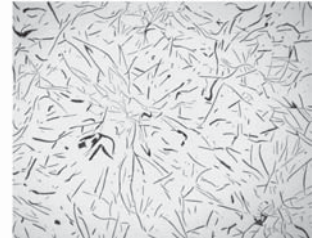
**Рис. 2.** Микроструктура чугуна, характерная для 1-го кулачка, модифицирование в форме FC40P3M10, x400



**Рис. 3.** Микроструктура чугуна, характерная для 8-го кулачка, модифицирование в форме FC40P3M10, x400



**Рис. 4.** Морфология графита в чугуне, характерная для 1-го кулачка, модифицирование в форме FC40P3M10, x100



**Рис. 5.** Морфология графита в чугуне, характерная для 8-го кулачка, модифицирование в форме FC40P3M10, x100

Существенный недостаток P3M при получении ЧВГ – образование чанкового (псевдоэвтектического) графита, наблюдающегося в массивных частях отливок, вызывающего снижение механических свойств, особенно относительного удлинения и ударной вязкости, и повышение теплопроводности чугуна. Появление такой структуры объясняется перемодифицированием чугуна церием (ликвация P3M в объемы расплава, затвердевающие последними), для устранения которой необходимо увеличивать скорость затвердевания отливок и одновременно с P3M вводить в расплав 0,04%Ti, 0,001%Sb или 0,02%Sn [6]. Для получения бескарбидной структуры ЧВГ после ввода P3M в чугун обязательно проводится обработка графитизирующим модификатором на основе ферросилиция.

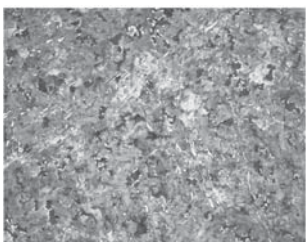
При увеличении расхода P3M наблюдается скачкообразное изменение формы графита от пластинчатой к вермикулярной. При образовании вермикулярного графита увеличивается по сравнению с исходным чугуном количество феррита, а при избыточном содержании P3M по мере появления включений шаровидного графита количество феррита уменьшается и появляется цементит. Количество критической присадки P3M зависит от степени рафинирования и температуры исходного расплава, способа ввода, состава присадки [7]. Введение лигатуры с P3M в количествах от 0,5 до 1,0% приводит к формированию вермикулярного графита [8]. При этом строение этих образований характеризуется как розеточное. При 10000-кратном увеличении видно, что включения вермикулярного графита не являются монолитными. Округлые концы этих включений представляют полшаровидные образования, поверхность которых состоит из множества лепестков. При росте количества вводимой лигатуры включение становится более компактным, но на его поверхности все также наблюдается множество ответвлений, состоящих из отдельных пластин, имеющих слоистую структуру. В любых участках вермикулярного графита на поверхности кристаллизации имеется множе-

ство отдельных лепестков, ответвлений сформировавшейся розетки графита.

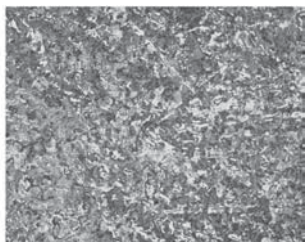
Для изучения технологических особенностей получения ЧВГ в отливках при внутриформенном модифицировании сплавами Fe-Si-P3M с различным содержанием P3M были проведены опытные заливки длинномерных деталей «Вал распределительный» 21214-1006015 (рис. 1) как наиболее показательных для прослеживания изменения структуры чугуна. При проведении 1-й опытной заливки использовали модификатор FC40P3M10, а при 2-й и 3-й FC50P3M20. В обоих модификаторах P3M представлено цериевым микшметаллом с содержанием церия 50% и лантана 25%. Расход модификаторов 250 г на форму металлоемкостью 60,5 кг (0,413%). На исследование были представлены три отливки «Вал распределительный». Для исследования отобраны образцы с 1-го и 8-го кулачка от каждой отливки.

Микроструктура отливок, отобранных от 1-й опытной заливки, полностью состоит из пластинчатого перлита (таблица, рис. 2, 3). Постоянно присутствующие типы графита в отливке А (равномерно распределенный) и Е (междендритный направленный) №4, а в 8-м кулачке, куда поступают первые порции расплава чугуна с повышенной концентрацией модификатора, также присутствует тип В (розеточный) – рис. 4, 5. Следовательно, при концентрации P3M в расплаве 0,04% (0,02% Ce и 0,01% La), даже принимая во внимание концентрационный перепад по длине отливки, вермикулярная форма графита еще не образуется. Однако присутствие в микроструктуре 8-го кулачка крупнорозеточной формы графита показывает наличие первой стадии процесса формирования вермикулярного графита. Относительно низкая твердость отливки (таблица), учитывая ее полностью перлитную структуру, позволяет сделать вывод о графитизирующем и смягчающем действии малых добавок P3M (до 0,04%) в чугуне.

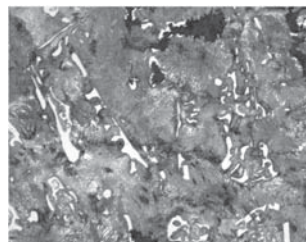
Микроструктура отливок, отобранных от 2-й опытной заливки, состоит из пластинчатого перлита с рав-



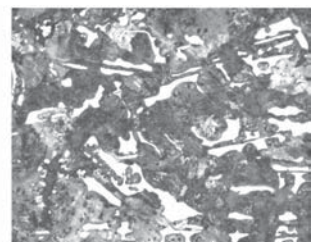
**Рис. 6.** Микроструктура чугуна, характерная для 1-го кулачка, модифицирование в форме FC50P3M20, x100



**Рис. 7.** Микроструктура чугуна, характерная для 8-го кулачка, модифицирование в форме FC50P3M20, x100



**Рис. 8.** Микроструктура чугуна, характерная для 1-го кулачка, модифицирование в форме FC50P3M20, x400



**Рис. 9.** Микроструктура чугуна, характерная для 8-го кулачка, модифицирование в форме FC50P3M20, x400

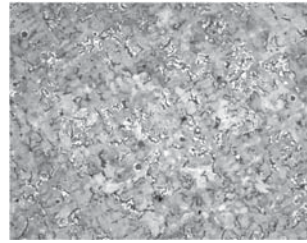




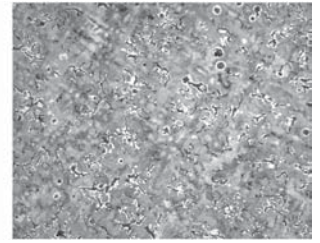
**Рис. 10.** Морфология графита в чугуне, характерная для 1-го кулачка, модифицирование в форме FC50P3M20, x50



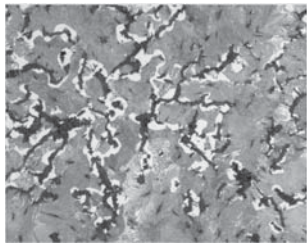
**Рис. 11.** Морфология графита в чугуне, характерная для 8-го кулачка, модифицирование в форме FC50P3M20, x50



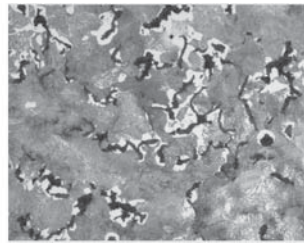
**Рис. 12.** Микроструктура чугуна, характерная для 1-го кулачка, предмодифицирование FC75л3, модифицирование FC50P3M20, x100



**Рис. 13.** Микроструктура чугуна, характерная для 8-го кулачка, предмодифицирование FC75л3, модифицирование FC50P3M20, x100



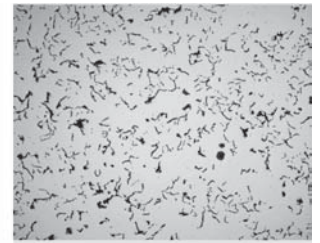
**Рис. 14.** Микроструктура чугуна, характерная для 1-го кулачка, предмодифицирование FC75л3, модифицирование FC50P3M20, x400



**Рис. 15.** Микроструктура чугуна, характерная для 8-го кулачка, предмодифицирование FC75л3, модифицирование FC50P3M20, x400



**Рис. 16.** Морфология графита, характерная для 1-го кулачка, предмодифицирование в чаше FC75л3, модифицирование в форме FC50P3M20, x100



**Рис. 17.** Морфология графита, характерная для 8-го кулачка, предмодифицирование в чаше FC75л3, модифицирование в форме FC50P3M20, x100

номерно распределенными включениями вторичного цементита (табл. 1, рис. 6–9). Графит в отливке практически полностью представлен вермикулярной (кораллоподобной) формой, а в объеме 8-го кулачка, обогащенного P3M, также присутствуют соседствующие области мелкодисперсного междендритного графита и полностью безграфитные области с включениями свободного цементита. Для лучшего обозревания различной морфологии графита и неоднородности его распределения по сечению изображение было сделано при увеличении x50 (рис. 10, 11). Концентрация P3M в расплаве 0,075% (0,038% Ce и 0,019% La) позволила получить полностью вермикулярную форму графита. Особенность полученной формы графита состоит в ее разветвленности. Концентрационный перепад P3M по длине отливки вызвал более высокое содержание свободного цементита в 8-м кулачке. Таким образом, ставится под сомнение стабильное получение вермикулярной формы графита в чугуне и его гомогенной структуры за счет простой обработки P3M.

Для получения однородной по графиту с минимальным перепадом механических свойств бесцементитной структуры отливки по всей длине была предложена технология получения отливок «Вал распределительный» с предмодифицированием. Предварительную графитизирующую обработку проводили в заливочной чаше формы куском FC75л3 затем расплав подвергали основному модифицированию P3M в камере формы.

Микроструктура отливок, отобранных от 3-й опытной заливки, представлена пластинчатым перлитом (таблица, рис. 12–15). Графит в отливке практически полностью представлен вермикулярной (кораллоподобной) формой как в 1-м, так и в 8-м кулачке (рис. 16, 17). Предварительное графитизирующее модифици-

рование позволило нивелировать градиент концентрации P3M по длине отливки, в результате чего была получена достаточно однородная структура. Для окончательной проверки на соответствие чугуна в отливке требованиям к марке ЧВГ40 были определены временное сопротивление на разрыв  $\sigma_b = 44$  кгс/мм<sup>2</sup> и относительное удлинение  $\delta = 1,2\%$ .

Принимая во внимание однородную микроструктуру опытных отливок «Вал распределительный» как по сечению, так и по длине и стабильность механических свойств, можно сделать вывод: технологию получения ЧВГ сплавами ферросилиция с P3M (50% Ce) с предмодифицированием можно считать достаточно надежной и стабильной. Конкретное содержание кремния и P3M в модификаторе необходимо подбирать в зависимости от размера и толщины стенки конкретной отливки, температуры расплава и других факторов. При использовании в модификаторе вместо цериевого мишметалла (с 50% Ce) лантанового мишметалла (с 50% La) из-за того, что лантан является самым слабым карбидообразующим элементов из всех других P3M, возможно получение структуры без цементита. Однако при этом получение вермикулярного графита возможно при более высоких концентрациях лантана, обладающего наименьшими сфероидизирующими способностями.

#### Список литературы

1. **Королев С.П.** Проблемы и перспективы чугуна с вермикулярным графитом // Литейное производство.– 2004.– №3.– С. 6–7.
2. **Литовка В.И., Ткачук И.В., Бех Н.И., Ерышканов Е.А.** Чугун с вермикулярным графитом // Литейное производство.– 1989.– №1.– С. 3–7; Лернер Ю.С., Таран Е.А., Сенкевич Ю.И., Соловьев Л.Е. Технология получения высокопрочного чугуна за рубежом // Литейное производство.– 1981.– №6.– С. 8–10.
3. **The Forty Ninth Annual Meehanite Conference UK and**

Overseas Delegates meet at Eastbourn // Foundry Trade J. 1983. V. 154. №3254. P. 31–38, 40–41.

4. **Sasari M., Taniguchi K., Yoshida C.** Получение чугуна с вермикулярным графитом // Имоно, Imono. I. Jap. Foundrymen's Soc. 1984. V. 56. №5. P. 295–302.

5. **Бех Н.И., Литовка В.И., Руденко Н.Г.** Чугун с вермикулярным графитом для корпусных деталей двигателей // Автомобильная промышленность.– 1985.– №4.– С. 26–27.

6. **Орехова А.И., Бурцев М.Ю., Козлов Л.Я.** Влияние неконтурируемых примесей редкоземельных металлов на структуру и свойства серых чугунов // Труды III Международной

научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». – М.: МИСиС, 2005.– С. 45–48.

7. **Козлов Л.Я., Орехова А.И., Бурцев М.Ю., Семенихина А.В.** Влияние РЗМ-содержащих лигатур на структуру синтетических и промышленных чугунов // Труды VII съезда литейщиков России: Т. I. Новосибирск: Историческое наследие Сибири, 2005.– С. 142–144.

8. **Воронцов В.И., Матвеев С.В.** Влияние РЗМ на формирование графита в чугунах // Труды III Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». – М.: МИСиС, 2005.– С. 48–50.

## С.С.Жуковский, А.Г.Коршаков (ООО «Уралхимпласт-Кавенаги», г. Нижний Тагил) Синтетические литейные связующие для новых технологических процессов

В мировом литейном производстве лидирующее положение занимают процессы изготовления стержней и форм из холоднотвердеющих смесей (ХТС). Они используются в серийном и индивидуальном производстве для отливок из чугуна, стали и цветных сплавов. Западными фирмами разработан ряд связующих композиций и, соответственно, техпроцессов с различными технологическими показателями. При выборе одного из них для создания нового производства или модернизации действующего руководствуются такими параметрами, как прочностные свойства, скорость отверждения, живучесть, поведение при контакте с металлом, экологические и экономические характеристики. В России поставщиком синтетических связующих более чем для 100 предприятий является российско-итальянская компания «Уралхимпласт-Кавенаги» в Нижнем Тагиле. Ее продукция имеет европейский технический уровень, поставляется региональными центрами, обеспечивается техническим сервисом по освоению и решению возникающих технологических вопросов.

Для массового и крупносерийного изготовления стержней, особенно в автомобильной и тракторной промышленности, транспортном машиностроении применение получили процессы, основанные на отверждении смесей газообразными реагентами, а именно:

- ХТС на базе фенольно-изоцианатного связующего с продувкой третичным амином – Cold-box-amin-процесс;
- ХТС на базе специального фенольного связующего с продувкой парами метилформиата – MF-процесс или процесс Бета-сет;
- ХТС с эпоксиакрилатным или фурановым связующим, отверждаемым продувкой  $SO_2$  (Epoch-  $SO_2$  или Furan-  $SO_2$ );
- ХТС на базе специального фенольного связующего с продувкой углекислым газом – Resol –  $CO_2$  – процесс;
- $CO_2$  – процесс на основе ХТС с жидким стеклом.

Процесс Cold-box-amin-универсальный по геометрии стержней и сплавам применительно к условиям массового и крупносерийного производства. В практике зарубежных литейных цехов развитых стран он является основным. Ведущие производители литейного оборудования в ФРГ, США, Италии поставляют для него стержневые комплексы. В их состав входят стерж-

невые машины с встроенными смесителями, газогенераторы, нейтрализаторы, для некоторых производств оборудование для окраски стержней водными красками и подсушки красок. На заводах России эта технология в последние годы широко внедряется для чугунного и алюминиевого литья (заводы ООО «Промтрактор-Промлит», Чебоксарский агрегатный и др.).

Указанный процесс изготовления стержней по холодным ящикам основан на способности полиуретановой связующей композиции отверждаться при продувке газообразным отвердителем. В качестве отвердителей применяются амины (триметиламин или диметилэтиламин). Стержневой ящик, заполненный песчано-смоляной смесью, при комнатной температуре продувается отвердителем в течение нескольких секунд, а затем продувается воздухом с целью очистки от амина. Избыток газа и смесь газа с воздухом поступают в нейтрализатор. Находящаяся в ящике стержневая смесь затвердевает по всему объему и набирает не менее 80% окончательной прочности, что позволяет извлекать из ящика ажурные и точные стержни, безупречно повторяющие геометрию полости стержневого ящика. Как правило, сложные наборы комплектов стержней для отливки блока цилиндров двигателя легкового автомобиля имеют отклонения от чертежных размеров не более 0,3 мм.

Процесс Cold-box-amin дает возможность коренным образом улучшить условия труда в стержневом отделении чугунолитейного цеха и экологическую ситуацию вокруг цеха. Улучшение условий труда обеспечивается организацией отсоса газа-отвердителя непосредственно от стержневого ящика в нейтрализатор, практически отсутствием выделения вредных газов из готового стержня, а также тем, что процесс осуществляется без нагрева стержневого ящика и сопутствующего нагреву выделения токсичных продуктов. Оператор стержневой машины работает в более комфортных, по сравнению с горячим процессом, условиях.

Следует особо подчеркнуть, что ни одно производство автомобильных отливок на современном уровне, а также освоение выпуска перспективных моделей автомобилей и двигателей невозможно без использования технологии изготовления стержней «по холодным ящикам». Применение этой технологии необходимо также для конкурентоспособного производства отли-