

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.17: 669.131

Д.А. Болдырев

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Исследовательский Центр ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти, РФ

На основе систематизации и обобщения сведений о модифицировании чугунов в условиях немодернизированного производства созданы технологии, позволяющие снизить себестоимость изготовления как уже освоенной, так и новой продукции при обеспечении требуемого уровня качества, а также обеспечить повышение специальных свойств продукции при возросших требованиях к работоспособности и ресурсу.

Ключевые слова: чугун; графитизирующее, сфероидизирующее модифицирование; микроструктура; лигатура.

Введение

В настоящее время заготовительные производства машиностроения и, в частности, автомобилестроения находятся в состоянии обновления. Заготовительные производства являются наиболее значимым и крупным элементом машиностроительного комплекса, закладывающим изначальный уровень качества продукции. Оценивая степень их оснащенности, следует отметить, что уровень и ресурс оборудования старого поколения как отечественного, так и зарубежного производства, уже не обеспечивает возросших требований к производительности и качеству продукции. Оборудованием нового поколения для заготовительных производств и, в частности, для литейного производства (печи, формовочные линии и т. д.), могут быть укомплектованы цеха только при выделении необходимого объема финансовых средств. У большинства производств на начальном этапе отсутствуют необходимые средства на модернизацию и реконструкцию материально-технической базы. В чугунолитейном производстве, изготавливающим наибольшее количество литых заготовок по сравнению с литейными производствами цветных сплавов, эта проблема стоит особенно остро. Таким образом, главной проблемой, которую необходимо решить, является разработка переходных и совершенствование существующих технологий получения чугунных отливок с использованием новых основных и вспомогательных материалов, позволяющих в зависимости от предъявляемых требований соответствовать либо заданному, либо возросшему уровню качества. Решению данной проблемы должны предшествовать обобщение и систематизация сведений о процессах модифицирования чугунов, как одних из наиболее важных в технологии получения литья. Реализация всех перечисленных мероприятий позволит производствам заработать средства, необходимые для запуска начальной стадии процесса модернизации.

Таким образом, **цель проводимой работы** – обобщение и развитие технологических основ модифицирования различных типов и марок конструкционных чугунов в отливках автомобилестроения.

Объекты исследования

Все виды конструкционных чугунов с различным типом графита, фазовым составом и структурой металла матрицы: высокопрочный чугун с шаровидным графитом, чугун с вермикулярным графитом и серый чугун с пластинчатым графитом.

В работе исследовались как отечественные (ЧВГ40, ВЧ50), так и зарубежные (Gh190B, Gh56-40-05, Gh65-48-05, Gh75-50-03) марки чугунов, применяемые в металлургическом производстве ОАО «АВТОВАЗ» для получения отливок деталей легкового автомобиля.

В частности, проводились исследования отливок деталей из следующих марок серого и высокопрочного чугунов фирмы Fiat (Италия):

- Gh190B – серый чугун с пластинчатым графитом на перлитной основе; требования по механическим свойствам: $HB_{5/750} \geq 200$, $\sigma_B \geq 265$ МПа;
- Gh56-40-05 – высокопрочный чугун с шаровидным графитом на перлитно-ферритной основе (перлита $\geq 50\%$), степень сфероидизации графита – не менее 90%; требования по механическим свойствам: $HB_{5/750}$ 180-250, $\sigma_B \geq 549$ МПа, $\delta \geq 5\%$;
- Gh65-48-05 – высокопрочный чугун с шаровидным графитом на перлитно-ферритной основе (перлита $\geq 50\%$), степень сфероидизации графита – не менее 90%; требования по механическим свойствам: $HB_{5/750}$ 190-280, $\sigma_B \geq 638$ МПа, $\delta \geq 5\%$;
- Gh75-50-03 – высокопрочный чугун с шаровидным графитом на перлитной основе (феррита $\leq 8\%$), степень сфероидизации графита – не менее 90%; требования по механическим свойствам: $HB_{5/750}$ 250-300, $\sigma_B \geq 736$ МПа, $\delta \geq 3\%$.

Оборудование и методы проведения испытаний и исследований

Опытные плавки проводились на следующем оборудовании металлургического производства ОАО «АВТОВАЗ»: «дуплекс»-процесс – электродуговая плавильная печь LBS-48 или 6ДСП-40 + индукционная тигельная печь LFD-20 или индукционная канальная печь LFR-45; индукционная тигельная печь-ковш ИСТ-0,4; формовочно-заливочные линии SPO, Georg Fisher, DISA. В работе использовалось следующее лабораторное испытательное оборудование: разрывные машины AMSLER 20ZBDA и TiraTest 2300 (определение временного сопротивления на разрыв σ_B и относительного удлинения δ); твердомер ТБ 5006 (определение твёрдости по Бринеллю); спектроанализатор Quantovak ARL 2460; газоанализатор Leko CS-400; ICP-спектрометр Liberty Series фирмы Varian; спектрограф Spectroma GDA-750 (определение химического состава); металлографический световой микроскоп UNIMET 8585, фирмы Бюллер; металлографический световой микроскоп фирмы Zeiss; электронный сканирующий микроскоп LEO 1455 VP с блоком рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 (анализ микроструктуры и графитных включений).

Результаты исследований и их обсуждение

Ввиду стремительного роста цены на никель для экономного сфероидизирующего ковшевого модифицирования и микролегирования чугуна целесообразен переход с никелевой лигатуры на медную, а также использование различных комбинированных лигатур. Была поставлена задача изучить эффективность применения для модифицирования ВЧШГ «тяжёлой» лигатуры на чисто медной основе, а затем – на никелевой и медной основах, разбавленных более дешёвыми элементами (Fe, Si) с учётом их влияния на требуемый диапазон содержания магния (14...17%).

Ковшевой расход «тяжёлой» лигатуры Cu-Mg-PЗМ, имеющей следующий химический состав: Mg 14...17%; PЗМ 0,4...0,6%; Cu – остальное, составляет 0,83%. По сравнению с

расходом лигатуры Ni-Mg-PЗМ – 0,45%, имеющей аналогичное содержание магния и PЗМ, расход лигатуры Cu-Mg-PЗМ выше в 1,85 раза. Однако, принимая во внимание в 3-4 раза меньшую стоимость меди по сравнению с никелем, технология обработки расплава чугуна лигатурой Cu-Mg-PЗМ в 1,5-2 раза дешевле, чем лигатурой Ni-Mg-PЗМ. Кроме того, назначаемая температура нормализации отливок деталей, полученных с помощью лигатуры Cu-Mg-PЗМ в среднем на 40°C ниже (870°C), чем для получаемых с лигатурой Ni-Mg-Ce (910°C). Нормализация при температуре 870°C по сравнению с литым состоянием позволяет получить требуемую прочность чугуна (844-903 МПа), сформировать более однородную перлитную структуру, устранять скопления свободного феррита вокруг графита («бычий» или «мягкий» глаз), снижать общее содержание свободного феррита с 5-12% до 4-5% без снижения относительного удлинения (>3,6%) при обеспечении необходимой твёрдости чугуна (НВ 269-298). Таким образом, переход на лигатуру Cu-Mg-PЗМ обеспечивает не только снижение себестоимости, но и стабилизацию качества отливок.

При ведении плавки на обогащённом медью возврате в расплаве снижается содержание никеля и марганца. Совместный прирост меди как из возврата, так и из лигатуры, до концентрации 1% позволяет полностью скомпенсировать снижение, а затем и полное отсутствие содержания никеля при поддержании содержания марганца в расплаве 0,25...0,35%.

По результатам испытаний лигатуры Cu-Ni-Mg-PЗМ сделан вывод о том, что она может быть использована в качестве переходного варианта для плавной, постепенной отработки технологического процесса сфероидизирующего модифицирования при замене лигатуры Ni-Mg-Ce на Cu-Mg-Ce. Ввиду того, что изначально влияние перехода на «тяжёлую» лигатуру с иной металлической основой неизвестно и может вызвать отклонения по структуре и свойствам, была предложена технология пошаговой замены лигатуры Ni-Mg-PЗМ на Cu-Mg-PЗМ при параллельной корректировке химического состава чугуна в печи.

Исследовано влияние более дешёвой добавки железа на эффективность работы «тяжёлых» лигатур на лигатурах с никелевой (Fe-Ni-Mg-PЗМ) и медь-никелевой (Fe-Ni-Cu-Mg-PЗМ) основами. Результаты испытаний показали худшее усвоения магния расплавом чугуна из «тяжёлой» лигатуры Fe-Ni-Cu-Mg-PЗМ по сравнению с лигатурой Fe-Ni-Mg-PЗМ. Более низкое усвоения магния, оцениваемое по степени сфероидизации графита в микроструктуре чугуна (ССГ), из лигатуры Fe-Ni-Cu-Mg-PЗМ (ССГ 40-70%), по сравнению с Fe-Ni-Mg-PЗМ (ССГ 50-70%), обусловлено её большей легкоплавкостью. При этом увеличение навески на 20% не обеспечило улучшения ССГ. Полученные результаты показывают нестабильность усвоения магния из опытных железосодержащих «тяжёлых» лигатур, которая объясняется следующим. Магний нерастворим в железе, однако при одновременном сплавлении железа с медью (никелем), он образует с ними насыщенные твёрдые растворы. Такие сплавы с повышенной концентрацией магния характеризуются низкой температурой плавления, что отрицательно влияет на усвоение из них магния расплавом чугуна, повышая его угар. Также следует отметить высокую склонность магния к ликвации: из-за его низкой плотности основное его содержание сосредотачивается в верхних слоях слитка, а нижние слои оказываются обеднёнными по магнию. В исследованных «тяжёлых» лигатурах железо использовалось для повышения общей температуры плавления сплава за счёт образования твёрдых растворов железа с медью и железа с никелем, имеющих более высокие температуры плавления, чем у чистой меди и никеля. Однако по результатам исследований ожидаемый ощутимый положительный эффект «условной тугоплавкости» выявлен не был.

Принимая во внимание результаты апробации «тяжёлых» лигатур Fe-Ni-Mg-PЗМ и Fe-Ni-Cu-Mg-PЗМ, был учтён вклад содержания железа в растворимость магния и при освоении производства «тяжёлой» лигатуры «железо-кремний-медь-магний-PЗМ» был предложен следующий оптимальный химический состав: Fe 8...11%, Si 11...14%, Mg 14...17%, PЗМ 0,9...1,2%, Cu – остальное. Данная лигатура наиболее экономична из всех «тяжёлых» магниесодержащих лигатур. В указанных пределах железо практически не влияет на раство-

римность магния в расплаве и служит в качестве относительно тугоплавкой добавки, повышающей общую температуру плавления лигатуры. Кремний при данном содержании в лигатуре несколько улучшает усвоение магния в расплаве и нивелирует влияние железа, а также служит охрупчивающей добавкой, улучшающей дробление лигатуры. По результатам исследований структуры и свойств чугуна в отливках (перлитная структура без сплошной толстой ферритной оторочки вокруг графитных включений («бычий» или «мягкий» глаз), $\sigma_B = 873$ МПа, $\delta = 6\%$) сделан вывод об идентичной работоспособности лигатур Fe-Si-Cu-Mg-PЗМ и Cu-Mg-PЗМ.

Таким образом, общий подход к разработке химического состава «тяжёлых» магнийсодержащих лигатур заключается в определении наиболее дешёвой металлической основы, хорошо растворяющей магний, и других добавок, дополнительно снижающих её стоимость и улучшающих технологические свойства (в частности, дробимость) при сбалансированном подборе их совместного содержания относительно заданного диапазона содержания магния.

При разработке и опробовании технологий ковшевого модифицирования высокопрочного чугуна на основе «сэндвич»-процесса с использованием «лёгких» лигатур типа ФСМг принималось во внимание, что новый технологический процесс должен органично вписываться в существующую схему производства чугуна с задействованием имеющегося базового оборудования и оснастки.

Учитывая, что «сэндвич»-процесс рекомендуется для модифицирующей обработки ВЧШГ в открытых ковшах, имеющих характеристическое соотношение (отношение высоты ковша к его среднему диаметру) – $2 \dots 2,5:1$, на первом этапе опытных работ ставилась задача видоизменения основной схемы «сэндвич»-процесса с учётом конструкции базовых ковшей металлоёмкостью 1,2 т, имеющих характеристическое соотношение $1,4:1$. Для опытных работ были выбраны «лёгкие» лигатуры марок ФСМг6 и ФСМг6Ла.

В первом варианте конструкции заливочного ковша, карман для модификатора в отличие от классического варианта был изготовлен в форме асимметричного усечённого конуса в центре пода футеровки ковша и расположен таким образом, чтобы наклон самой длинной образующей был направлен в сторону носка ковша.

Во втором варианте конструкции заливочного ковша в качестве кармана для модификатора была использована керамическая вставка в виде полого усечённого конуса из огнеупорного материала – муллитовой массы.

В третьем варианте конструкции заливочного ковша для создания реакционного кармана были использованы огнеупорные кирпичи различной конструкции и типоразмеров.

На практике при опробовании всех 3-х разработанных технологических схем была многократно подтверждена принципиальная невозможность стабильного модифицирования высокопрочного чугуна по «сэндвич-процессу» в открытых серийных заливочных ковшах с самой различной конструкцией и расположением реакционного кармана для размещения модификатора. Анализ всех трёх способов ковшевого модифицирования ВЧШГ, созданных на базе «сэндвич»-процесса, показывает, что несмотря на получаемые в отливках требуемые структуру и свойства, из-за увеличения времени технологического цикла, связанного с обслуживанием ковшей с изменённой конструкцией футеровки, они успешно могут быть применены в мелкосерийном производстве. В ходе отработки всех трёх вариантов ковшевого модифицирования на основе ресурсосберегающего подхода были подобраны концентрационные диапазоны содержания легирующих элементов, необходимых для микролегирования расплава с целью обеспечения требуемых нормативно-технических показателей.

При существующем характеристическом соотношении в ковше – $1,4:1$ устойчивость технологического процесса модифицирования ВЧШГ может быть обеспечена только путём его усовершенствования, дооснащения и в итоге – трансформации в процесс «ковш с крышкой». Использование данной технологии может быть оправданным при получении отливок из средних марок высокопрочного чугуна, например, Gh56-40-05, Gh65-48-05 (перлитно-

ферритная металлическая матрица, ССГ – 90%, НВ 180-249). По технологии «ковш с крышкой» модификатор типа ФСМг размещается на днище ковша в его носковой части, а крышка надевается таким образом, чтобы верхнее отверстие заливочной воронки для заливки расплава чугуна располагалось диаметрально противоположно носку ковша.

По результатам опытных работ доказано, что при изготовлении отливок из более низких марок высокопрочного чугуна – до ВЧ50 включительно – могут быть использованы более упрощённые по отношению к «сэндвич-процессу» технологии для открытого ковша – «заливка сверху» и «контейнерная» технология. Полученные структура и свойства в опытных отливках: для ЧВГ40 – перлитно-ферритная металлическая матрица, преобладание вермикулярного графита над шаровидным, НВ 187-239, для ВЧ50 – перлитно-ферритная металлическая матрица, ССГ $\geq 80\%$, НВ 170-229.

Определение необходимого баланса содержания функционально значимых элементов (Mg, Ca и PЗМ) в составе специальных модификаторов для получения ЧВГ имеет особое значение с точки зрения стабильности графитообразования. Анализ результатов сравнительных испытаний двух модификаторов ФСМг4,5PЗМ4,5 и ФСМг5,5PЗМ6 на чугуне марки ЧВГ40 показал, что химический состав модификатора ФСМг5,5PЗМ6 несбалансирован по сравнению с составом модификатора ФСМг4,5PЗМ4,5. Это выражается нестабильностью образования и неоднородностью распределения вермикулярного графита по длине отливки, и связано с повышенным содержанием в составе модификатора магния, PЗМ и кальция.

Учитывая, что ЧВГ называется чугун, в микроструктуре которого находится не более 40% шаровидного графита, оптимальный расход модификатора ФСМг5,5PЗМ6 составляет 3,6 кг на 1200 кг чугуна (0,3%). При меньшем расходе данного модификатора в микроструктуре чугуна начинает появляться пластинчатый графит. Пропорциональное изменение содержания магния и PЗМ в модификаторе неэквивалентно пропорциональному изменению его расхода. Это подтверждает тот факт, что 5 кг модификатора ФСМг4,5PЗМ4,5 обеспечивают лучшее структурообразование и формирование свойств ЧВГ (перлит, феррита не более 20%, вермикулярный графит, шаровидного графита не более 15%, НВ 229-239), чем 3,7-4,5 кг модификатора ФСМг5,5PЗМ6 (перлит, феррит 5-30%, вермикулярный и шаровидный графит при содержании последнего от 3 до 60%, НВ 217-275). То есть в составе специализированного модификатора для получения ЧВГ должно содержаться около 4,5% магния и PЗМ и строго ограниченное содержание кальция (бария) и алюминия.

Таким образом, основываясь на результатах производственных экспериментов, предложены технологические схемы получения отливок из основных марок ВЧШГ и ЧВГ ковшевым модифицированием без изменения существующего состава шихты, оборудования и оснастки в зависимости от требуемой марки: Gh56-40-05, Gh65-48-05 – технологии «ковш с крышкой», «сэндвич»-процесс; ЧВГ40, ВЧ50 – технология «заливка сверху», «контейнерная» технология; Gh75-50-03 – технология модифицирования «тяжёлой» лигатурой на медной основе. Установлено, что результат влияния различных технологических параметров заключается в получении из расплава чугуна одного и того же химического состава нескольких марок чугунов за счёт применения различных модифицирующих материалов и технологий модифицирования.

Показано, что использование классического ферросиликомагния (на примере модификатора ФСМг7) в качестве сфероидизирующей добавки при модифицировании в форме имеет ряд недостатков, в числе которых – повышение склонности к образованию усадочной пористости и наличие в микроструктуре чугуна шлаковых включений ввиду невозможности их вывода за пределы литниковой системы.

Известно, что добавки PЗМ в качестве дополнения к магнию способствуют росту графита более правильной формы и повышают стабильность модифицирующего эффекта. Однако особенности влияния PЗМ в составе магниевого модификатора описаны по результатам

исследования мишметалла – смеси, содержащей около 50% Се, 25% La, 15% Nd и 10% Pr. Влияние конкретных РЗМ в составе магнийсодержащих модификаторов на структурообразование ВЧШГ до сих пор остаётся недостаточно изученным.

Лантан по сравнению с другими РЗМ обладает более слабым карбидообразующим и сфероидизирующим действием в чугунах. Выдвинуто предположение, что лантан в качестве дополнительной добавки к магнию, снижающей его активность, способен пролонгировать реакцию модификатора с расплавом и процесс графитообразования, что может снизить склонность чугуна к усадке.

Результаты испытаний показали, что процент брака отливок по усадке при использовании модификатора ФСМг5,5La (0,19%) более чем в три раза ниже, чем с модификатором ФСМг7 (0,62%). Визуальная оценка состояния поверхности отливок показывает её более высокую чистоту, отсутствие шлаковых дорожек. По сравнению с модификатором, содержащим мишметалл, ФСМг5,5La обеспечил количество глобулей шаровидного графита больше в 1,75 раза.

При использовании модификатора ФСМг5,5La получено образование большого количества мелких глобулей вторичного графита и конгломератов крупных глобулей первичного графита с ярко выраженным бимодальным асимметричным статистическим распределением диаметров графитных включений. Влияние лантана на графитообразование в ВЧШГ проявляется в уменьшении скорости роста графита, что повышает вероятность коагуляции графитных глобулей в жидком расплаве. Снижением скорости роста графита также объясняется задержка выделения графита из аустенита и формирование мелких глобулей вторичного графита. Более позднее по времени выделение вторичного графита компенсирует усадочные процессы в отливке в момент прекращения функционирования прибылей, что обеспечивает снижение пористости и повышение механических свойств чугуна (для ВЧШГ марки Gh56-40-05: $\sigma_b = 589-657$ МПа, $\delta = 5-6\%$, HB 198-249).

При получении ЧВГ внутриформенным способом модифицирования в отличие от ковшевого перемешивания расплава существенно хуже и в результате полноценного равномерного перераспределения компонентов чугуна не происходит, развивается расслоение шаровидного и вермикулярного графита. Дополнительным фактором, ухудшающим структурообразование, является использование в качестве материала для внутриформенной обработки ЧВГ модификатора с относительно высоким содержанием магния (свыше 6,5%) и низким содержанием РЗМ (менее 0,8...1,0%) в количестве, недостаточном для получения необходимой степени сфероидизации графита.

Всё указанные недостатки наиболее ярко выражены при получении длинномерных отливок (при соотношении среднего диаметра к длине $\geq 1:15$). Структура, получаемая в отливках из ЧВГ по технологии внутриформенного модифицирования, отличается от регламентируемой для ЧВГ отклонениями не только по количеству шаровидного графита (ШГ более 40%), но и по его распределению как по сечению, так и по длине отливки. При использовании классического ферросиликомагния (модификатора ФСМг7, среднее содержание магния – 7%, РЗМ – 0,5%) для формирования вермикулярной формы графита за счёт эффекта немодифицирования в микроструктуре отливки наблюдаются следующие отклонения.

Во-первых, имеет место морфологическое расслоение графита по высоте сечения отливки: в верхней половине отмечается наличие преимущественно шаровидного графита, а в нижней – преимущественно вермикулярного. Механизм расслоения графита по высоте сечения заключается в том, что расплав при затекании в полость формы в процессе реакции с модификатором в реакционной камере плохо перемешивается и магний, имеющий малый удельный вес ($1,7 \text{ г/см}^3$) всплывает в верхнюю часть отливки, вызывая, тем самым, образование в ней преимущественно шаровидной формы графита. Такая особенность распределения графита по сечению отливки провоцирует при сверлении внутреннего отверстия увод пу-

шечного сверла в её нижнюю, более мягкую часть. При этом разброс по твёрдости между верхней и нижней половинками сечения отливки составляет в среднем 20...25 НВ.

Во-вторых, имеет место неоднородность структуры по длине отливки, что вызывает значительный разброс по твёрдости (от 12 до 56 НВ) между 1-м (структура с преобладанием вермикулярного графита ВГф2, ВГф3 над шаровидным) и 8-м (структура с шаровидным графитом – ШГд25, ШГд18) кулачком.

В-третьих, из-за относительно высокого содержания в модификаторе шлакообразующего элемента – кальция и несколько завышенного содержания магния микроструктура чугуна загрязняется шлаковыми включениями. Один из таких характерных дефектов был детально исследован с помощью электронного микрорентгеноспектрального анализа. Из анализа спектра следует, что шлаковые включения представляют собой конгломераты комплексных оксидов магния и кальция.

Известно, что РЗМ являются наилучшими стабилизаторами вермикулярной (при повышенном содержании РЗМ и пониженном содержании магния) и шаровидной (при пониженном содержании РЗМ и повышенном содержании магния) форм графита в чугуне. Однако также следует учитывать, что содержание РЗМ в модификаторе ограничивается их высокой стоимостью и антиграфитизирующими свойствами.

Таким образом, главной задачей по совершенствованию состава модификатора для внутриформенной обработки чугуна с целью получения преимущественно вермикулярной формы графита является, как и при ковшевом модифицировании, сбалансированный подбор концентраций магния и РЗМ. При подборе рецептуры был взят за основу классический модификатор ФСМг7, в химическом составе которого постепенно повышали содержание РЗМ и снижали содержание магния. При этом содержание графитизирующих элементов (Ba, Ca, Al), входящих в состав модификатора для внутриформенного модифицирования, необходимо строго минимизировать из-за их склонности к шлакообразованию и скоплению образовавшихся включений преимущественно на границах зёрен, учитывая отсутствие возможности проведения операции шлакоудаления.

Для опытной работы по повышению качества чугуна в отливках из ЧВГ был приготовлен специальный модификатор ФСМг6РЗМ1,5 с содержанием магния 5,8...6,3%, РЗМ 1,2...1,5% и кальция – до 0,4%. Перлитно-ферритная структура ЧВГ во всех опытных отливках характеризуется наличием 90% вермикулярного графита при однородном его распределении как по сечению, так и по длине отливки и обеспечивает следующие механические свойства: $\sigma_b = 476-500$ МПа, $\delta = 1,2-1,6\%$, НВ 229-255.

Для изучения технологических особенностей получения ЧВГ в отливках при внутриформенном модифицировании сплавами системы Fe-Si-РЗМ с различным содержанием РЗМ были проведены опытные заливки отливок с модификаторами ФС40РЗМ10 и ФС50РЗМ20. Анализ микроструктуры опытных отливок, залитых с ФС40РЗМ10, показал постоянно присутствующие типы графита – ПГр1 и ПГр9, а в 8-м кулачке, куда поступают первые порции расплава чугуна с повышенной концентрацией модификатора, также присутствует и тип ПГр7. Микроструктура отливок полностью представлена пластинчатым перлитом. Следовательно, при концентрации РЗМ в расплаве 0,04%, даже принимая во внимание концентрационный перепад по длине отливки, вермикулярная форма графита ещё не образуется.

Однако присутствие в микроструктуре 8-го кулачка крупнорозеточной формы графита показывает наличие первой стадии процесса формирования вермикулярного графита. Относительно низкая твёрдость отливки (до 163 НВ), учитывая её полностью перлитную структуру, позволяет сделать вывод о графитизирующем и смягчающем действии малых добавок РЗМ (до 0,04%) в чугуне. Анализ микроструктуры опытных отливок, залитых с ФС50РЗМ20, показал, что графит в отливке практически полностью представлен вермикулярной формой, а в объёме 8-го кулачка, обогащённого РЗМ, также присутствуют соседствующие области

мелкодисперсного междендритного графита и полностью безграфитные области с включениями свободного цементита.

Микроструктура отливок состоит из пластинчатого перлита с равномерно распределёнными включениями вторичного цементита (Ц10-15). Концентрация РЗМ в расплаве 0,075% позволила получить полностью вермикулярную разветвлённую форму графита. Концентрационный перепад РЗМ по длине отливки вызвал более высокое содержание свободного цементита в 8-м кулачке. Для получения однородной по графиту и с минимальным перепадом механических свойств бесцементитной структуры отливки по всей длине была предложена технология внутриформенного модифицирования ФС50РЗМ20 с предмодифицированием кусковым ФС75. Графит в отливке практически полностью представлен вермикулярной формой и в 1-м и в 8-м кулачке. Предварительное графитизирующее модифицирование позволило нивелировать в ЧВГ градиент концентрации РЗМ по длине отливки, в результате чего была получена достаточно однородная бесцементитная структура с небольшим количеством феррита (П85-90), обладающая следующими свойствами: $\sigma_b = 432$ МПа, $\delta = 1,2\%$, НВ 239-244.

Для повышения прочностных свойств ЧВГ может быть использован такой наименее энергоёмкий и технологичный вид термической обработки как нормализация. Для исследования была выбрана та же деталь «Вал распределительный». Операция нормализации проводилась в проходной газовой печи по ступенчатому режиму: нагрев отливок вместе в печи до температуры 750°C, выдержка 40 мин, нагрев до температуры 910°C, выдержка 1 ч 40 мин, охлаждение на воздухе в течение 2-х часов. Микроструктура ЧВГ до нормализации: ВГф2, ВГф3, ВГ90, ПГф1; Пт1, П85. В структуре ЧВГ после нормализации содержание феррита осталось неизменным, а основная структура металлической матрицы представлена сорбитообразным перлитом. То есть после нормализации произошло повышение дисперсности и уплотнение перлитной составляющей при неизменном $\delta = 1,2\%$, твёрдость нормализованного чугуна возросла с 229 НВ до 260 НВ, а σ_b – до 500 МПа.

По результатам расширенных производственных испытаний барийсодержащего графитизирующего модификатора ФС65Ba4 сделан вывод о его высокой эффективности: снижение расхода модификатора ФС65Ba4 по сравнению с ФС75лб составляет от 14,3 до 50% в зависимости от габаритов и толщины стенки конкретной отливки. Механические свойства и микроструктура чугуна в отливках находятся в соответствии с установленным нормативом для каждой марки чугуна.

При сравнении твёрдости и анализе особенностей микроструктуры чугуна в отливках при первичном (ковшевом) и вторичном (в чаше формы) модифицировании становится очевидным, что эффективность позднего модифицирования намного выше раннего.

При вторичном модифицировании расплава чугуна в чаше формы кусковым модификатором ФС55Ba22, оценивая морфологию графита, следует отметить значительное преобладание правильной шаровидной формы графита ШГф5, а при первичном модифицировании расплава чугуна модификатором ФС55Ba22 в крупке шаровидный графит представлен, преимущественно, типом ШГф4 – неправильной формой.

Обе формы шаровидного графита допустимы в микроструктуре ВЧШГ, однако тип ШГф5 характеризует более высокое качество и эффективность графитизирующей обработки высокобаристым ферросилицием, проводимой в момент заполнения формы, что связано с большим количеством остающихся в расплаве ЦЗ. Становится также очевидным, что при использовании высокобаристого ферросилиция для первичного модифицирования в микроструктуре отливок более мелких графитных включений ШГд45 в среднем больше, чем при вторичном модифицировании кусковой фракцией в чаше формы, а количество более крупных включений ШГд90 в обоих случаях одинаково. Установлено, что первичное модифицирование ВЧШГ позволяет обеспечить снижение твёрдости чугуна в отливках (НВ 182-255) и более высокое содержание феррита (П30-80), а вторичное модифицирование – рост твёрдости (НВ 202-272) и более сильную перлитизацию матрицы (П45-80).

Основу комплексных смесевых модификаторов (МК) нового поколения в отличие от традиционных смесевых модификаторов, получаемых из отсеков выплавляемых модификаторов, составляют порошки активированного высокотемпературной обработкой углерода (графита) и полученного физико-химическим путём кристаллического кремния при синтезе органогалогенсиланов. Главная особенность МК заключается в их высокодисперсном фракционном составе (10-30 мкм), что должно обуславливать резкое повышение модифицирующей способности и «живучести» смеси.

Литая микроструктура отливок «Вал коленчатый» из чугуна Gh75-50-03, полученных с применением смесового модификатора МККа21, с соотношением массовых частей углеродсодержащего материала к кремнийсодержащему 2:1 и добавлением 5% Са, имеет до 1% цементита по границам зёрен, следовательно, расход данного модификатора 1 и 2 кг на ковш 1200 кг не обеспечивает необходимый модифицирующий эффект при получении требуемых механических свойств ($\sigma_b = 785-804$ МПа, $\delta = 8,0-8,8\%$, НВ 229-285). Механические свойства чугуна в отливках «Вал коленчатый» после нормализации: $\sigma_b = 834-873$ МПа, $\delta = 5,2-8,0\%$, НВ 255-302. Микроструктура нормализованных отливок имеет от 2 до 5% вторичного цементита по границам зёрен. Данное явление, по-видимому, объясняется недостатком общего содержания кремния в химическом составе чугуна из-за его малого содержания в модификаторе. То есть имеющийся мелкодисперсный графит оказывает определённое влияние только на формирование структуры чугуна из жидкого состояния и не влияет на его структуру после термообработки (нормализации).

На практике установлено практически полное отсутствие графитизирующего эффекта при вводе материала МК21 (C:Si = 2:1) на днище ковша. Графит в отливках полностью представлен типом ШГф4 – шаровидной неправильной формой, что объясняется достаточной для формирования глобулей концентрацией остаточного магния при недостаточном количестве центров зарождения графита, в результате чего нарушается их равномерный объёмный рост.

При засыпке в стояк литейной формы перед заполнением её чугуном 0,1% (65 г) материала МКМг19 (C:Si = 1:9 с добавлением 5% Mg) отбел уменьшился до 10% на глубину 8 мм от поверхности. Одновременное присутствие в структуре чугуна вместе с перлитом феррита и цементита указывает на недомодифицирование чугуна, так как при достаточном количестве модификатора углерод перераспределяется и участвует в формировании перлитной структуры. Механические свойства в отливках из чугуна ВЧ50: $\sigma_b = 775$ МПа, $\delta = 9,6\%$, НВ 239-255. Увеличение расхода материала МКМг19 в форму свыше 0,15% (100 г) позволило полностью устранить свободный цементит, следовательно, количество модификатора оказалось достаточным для полноценной обработки расплава чугуна. Механические свойства в отливках из чугуна ВЧ50: $\sigma_b = 765$ МПа, $\delta = 8,8\%$, НВ 249-255. Видно, что твёрдость отливок осталась на том же уровне, что и у отливок, залитых с 0,1% МКМг19. По результатам определения механических свойств можно заключить, что свойства чугуна в отливке соответствуют марке ВЧ70. Таким образом, для получения высокопрочного чугуна марки ВЧ70 может быть рекомендована следующая схема модифицирования: сфероидизирующая ковшевая обработка с последующим введением в стояк формы 0,15% модификатора МКМг19.

Для достижения рациональной литой структуры чугуна при нарушении технологии модифицирования (в случае недомодифицирования, перемодифицирования), отклонений химсостава чугуна и модификаторов, применена технология встречного модифицирования с использованием модификатора, условно названного – Glitter (от англ. – блестеть) на основе теллурида висмута – Bi_2Te_3 .

Использование модификатора Glitter для подавления ферритообразования в структуре ВЧШГ, перемодифицированного графитизирующим модификатором, явилось достаточно эффективным: при увеличении расхода ФС75лб в 1,7 раза (2,2 кг вместо 1,3 кг) в структуре чугуна преобладает перлитная составляющая П60-70 (НВ 241-246).

При исключении операции ковшевого графитизирующего модифицирования ВЧШГ, введение модификатора Glitter в ковш совместно с поздним графитизирующим модифицированием кусковым ферросилицием вызывает повышенное ферритообразование: доля перлита в структуре сокращается до 15% (НВ 197-207).

Совместное введение в расплав чугуна в ковше модификатора Glitter и ФС75лб без последующего вторичного модифицирования кусковым ФС75лз в заливочной чаше формы позволило получить практически полную перлитизацию металлической матрицы ВЧШГ (П95) при твёрдости НВ 255-272.

Таким образом, модификатор Glitter в зависимости от стадийности ввода с графитизирующим модификатором или без него может быть использован для изменения механических свойств ВЧШГ и получения практически любой структуры металлической основы (от чисто перлитной до ферритной).

В качестве альтернативы вторичному графитизирующему модифицированию ВЧШГ кусковым ферросилицием была разработана технология модифицирования брикетами из отсевов производства графитизирующих модификаторов (ФС75, ФС65Ба1 и др.). Технология изготовления брикетов из ферросилиция с добавками активных элементов для вторичного графитизирующего модифицирования ВЧШГ является ресурсосберегающей, так как при этом используются отходы основного производства, и энергосберегающей – в результате ухода от переплава отходов (отсевов) и связанного с этим дополнительного расхода энергоносителей.

К отработке были предложены 2 схемы вторичного модифицирования – в заливочной чаше и внутри формы. По результатам испытаний установлена кинетика растворения брикета в расплаве чугуна. Процесс протекает в несколько этапов: начало формирования («намо-раживания») на поверхности брикета корочки чугуна; её рост до полного обволакивания брикета; вскипание связующих веществ на поверхности брикета; разделение брикета на фрагменты и автономное растворение фрагментов брикета.

Анализ полученных результатов показывает, что возникающая в некоторых случаях недостаточная степень сфероидизации графита в чугуне отливки связана с нестабильностью растворения брикета из-за неточного дозирования связующих компонентов. При этом возможны два случая:

- преждевременное растворение брикета за время наполнения формы из-за недостаточного количества связующих материалов и/или высокой температуры заливаемого чугуна;
- неполное растворение брикета за время наполнения формы из-за избыточного содержания связующих материалов и/или низкой температуры заливаемого чугуна.

Таким образом, успешное применение брикетированных отсевов производства модификаторов для вторичного модифицирования ВЧШГ возможно только при строгом контроле количества связующих веществ, давления прессования, а также определения для каждой отливки необходимой температуры заливки чугуна с точки зрения пролонгированного и, в то же время, полного растворения брикета за время заполнения формы. При достижении таких условий кинетика растворения брикета будет сопоставима с кинетикой растворения кускового ферросилиция.

В ходе выполнения исследований установлено, что применение литых быстроохлаждённых вставок на основе ферросилиция для графитизирующего внутрiformенного модифицирования позволяет улучшить форму шаровидного графита (преобладание формы ШГф5), продлить действие магниевого модификатора, уменьшить размер и обеспечить равномерное распределение графита по объёму металлической матрицы, предупредить появление цементита и подавить появление крупнодисперсных ферритных областей. Дополнительно достигнута высокая прочность и полностью перлитная структура в отливках из ВЧШГ высоких марок. Достижение такого комплексного эффекта объясняется мелкодисперсной структурой литой вставки, отливаемой в водоохлаждаемый кокиль.

На первом этапе была реализована попытка с помощью литых вставок получить в лите структуре, соответствующую нормативам для нормализованных отливок «Вал коленчатый» с содержанием равномерно распределённого феррита в структуре чугуна не более 8%. Стендовые натурные испытания показали преодоление деталью требуемых 600 часов ходимости. Испытания на усталостную долговечность показали, что все три детали выдержали 90 тыс., 111 тыс. и 140 тыс. циклов до разрушения.

На втором этапе работы была решена задача получения требуемых характеристик структуры и свойств чугуна в отливках только за счёт использования быстроохлаждённой литой вставки без первичного графитизирующего модифицирования и нормализации. Показано, что внутриформенное модифицирование ВЧШГ литыми вставками позволяет повысить временное сопротивление деталей «Вал коленчатый» в литом состоянии в среднем на 70 МПа, а в нормализованном – в среднем на 40 МПа.

Для получения объективной информации о влиянии на структурообразование чугуна активных добавок, входящих в состав графитизирующих модификаторов, были проведены сравнительные производственные испытания на одной и той же детали из чугуна одной марки. Сопоставительные испытания были проведены на сером чугуне марки Gh190В для отливки «Блок цилиндров» при использовании трёх видов модификаторов ФС65Ба1, ФС75СтЦр и ФС75Ба2,5.

На первом этапе проведено подробное изучение модифицирующей способности модификаторов ФС75СтЦр и ФС75Ба2,5. Металлографический анализ чугуна отливок показал, что при использовании модификатора ФС75Ба2,5 в отличие от ФС75СтЦр форма графита даже в зоне литейной корки гильзы цилиндров не междендритная (ПГ р8, ПГ р9), а равномерно распределённая, без преимущественного направления (ПГ р1).

На втором этапе установлено снижение расхода модификатора ФС75Ба2,5 по сравнению с ФС75СтЦр примерно на 20%. Металлографический анализ одной из отливок опытной партии показал полное соответствие микроструктуры и механических свойств установленному нормативу.

На третьем этапе работ были проведены расширенные производственные испытания модификатора ФС75Ба2,5 без добавления графита в зёрнах при расходе 3...4 кг на ковш. Снижение в два раза количества возвращенных ковшей при использовании модификатора ФС75Ба2,5 показывает его высокую эффективность, обеспечивающую стабильность процесса модифицирования по сравнению с ФС75СтЦр в совокупности с графитом в зёрнах.

Таким образом, по результатам расширенных производственных испытаний данных модификаторов подтверждено влияние содержания кремния, а также количества и вида активных добавок на эффект графитизирующего модифицирования.

При графитизирующем модифицировании чугуна в ковше микроструктура поверхностных слоёв и на глубине в достаточно крупных отливках, например, «Блок цилиндров», характеризуется неоднородным распределением графита и наличием свободного феррита. Одним из возможных вариантов подавления свободного феррита является микролегирование. При доведении в чугуне Gh190В содержания меди до 0,4% и олова до 0,13% свободный феррит в отливках «Блок цилиндров» был устранён. Другим возможным вариантом снижения содержания феррита является уменьшение дозы вводимого модификатора, однако при этом повышается вероятность получения отбела. Для преодоления этого противоречия опробовано вторичное внутриформенное модифицирование литыми вставками на основе ферросилиция с активными графитизирующими добавками. Для удобства установки в нижнюю полуформу литая вставка была совмещена с керамическим фильтром в виде комбифильтра. Наличие в составе модификатора Са, Мп, РЗМ позволило снизить массу литой вставки до 0,1% (110 г) от металлоёмкости литниковой системы. Результаты исследований показали, что наиболее приемлемым вариантом для эффективного модифицирования низкосернистого чугуна

для крупногабаритных отливок является следующая двухступенчатая схема: ФС40РЗМ10 в количестве 1,0 кг в ковш в сочетании с литой вставкой массой 110 г в форму.

В технологии получения мелкого тонкостенного литья из серого чугуна с повышенным содержанием серы – 0,06...0,08%, например, отливок «Поршневое кольцо», ввиду высоких требований к качеству структуры и свойств совместно применяется смесь следующих модификаторов – ФС65Ба1 и комплексного модификатора ФС30У60, состоящего, в свою очередь, из ферросилиция, силикокальция и графита. Общая масса навески данного смесового модификатора – около 1,1 кг. Несмотря на то, что сера снижает жидкотекучесть чугуна и несколько повышает его склонность к отбелу, в сером чугуне для мелких тонкостенных отливок она позволяет формировать регламентируемый нормативом розеточный ППг7 мелкодисперсный графит ППд15-25. Совместное применение модификаторов ФС65Ба1 и ФС30У60 в данном случае позволяет увеличить количество центров кристаллизации графита для обеспечения роста пластинчатого графита в чугуне, снизить степень переохлаждения чугуна в процессе эвтектической кристаллизации, что позволяет свести к минимуму вероятность образования отбела, особенно в тонкостенных отливках, и улучшить обрабатываемость. Однако совместное действие этих модификаторов явилось недостаточно эффективным – уровень литейного брака в виде шлаковых включений и газовых раковин превышает установленный норматив. Указанные недостатки данного комплексного модификатора обусловлены наличием в его составе повышенных концентраций алюминия, вызывающего газовую пористость, и кальция, стимулирующего повышенное шлакообразование при связывании серы. Таким образом, с целью повышения эффективности использования графитизирующего модификатора для высокосернистого чугуна (при содержании серы от 0,05% и выше) необходимо введение в его состав элементов, имеющих высокое сродство к сере, при максимальном ограничении шлакообразующих (барий и кальций) и газообразующих элементов (алюминий).

Для опробования были взяты модификаторы ФС75Ст и ФС75СтЦр. Анализ результатов заливки опытно-промышленной партии поршневых колец с применением опытных модификаторов показал: снижение на 21% внутреннего литейного брака и на 33% – внешнего брака при механической обработке; высокую эффективность опытного модификатора при обработке расплава серого чугуна марки СЧ40, что дало возможность снизить его навеску до 0,4 кг; снижение отбела в микроструктуре отливок с 0,06% до 0,003%.

При исследовании эффективности работы смесового модификатора на СЧПГ для отливок деталей «Блок цилиндров» усвоение углерода и кремния из модификатора в металле составило 35-65% и 50-100% соответственно. Микроструктура и твердость полученных отливок: перлит, феррит до 5%, кромочный цементит на глубину до 2 мм, междендритный графит ППг8, ППг9; НВ 229. Одной из версий низкого усвоения мелкодисперсных компонентов модификатора и, как следствие, недостаточного модифицирования чугуна, может быть наличие большого количества фракции, имеющей размер меньше критического, с точки зрения смачивания и растворения в расплаве чугуна, которая выносятся на поверхность зеркала металла и сгорает на воздухе. Однако при увеличении размера фракции модификатора теряется эффект кластерного зарождения включений графита.

Таким образом, на практике для составляющих модификатора – мелкодисперсного графита, являющегося кластерными зародышами графитных включений в чугуне и мелкокристаллического кремния, усиливающего образование и рост включений графита, главной проблемой является улучшение их усвоения расплавом. Ввиду того, что в микроструктуре отливки присутствует и феррит и цементит, имело место немодифицирование расплава.

По результатам испытаний смесового модификатора на СЧПГ необходимо отметить следующее.

1. Ковшевое модифицирование расплава чугуна материалом МК21 в количестве ~ 0,15% (2 кг) не обеспечило необходимое качество чугуна в отливке. В отливке присутствует поверхностный отбел на глубину 5 мм и графит типов ППг8, ППг9; НВ 229.

2. При введении в стояк формы 0,05% (15 г) материала МКМг19 отбел с поверхности уменьшился с 5 до 1,5 мм, а также был устранён междендритный графит ПГр9; НВ 217-229.

3. Увеличение расхода материала МКМг19 в форму до 0,1% (30 г) позволило полностью устранить свободный цементит и графит ПГр8, следовательно, количества модификатора оказалось достаточным для полноценной обработки расплава, в результате чего переохлаждение чугуна было устранено; НВ 207-217.

Таким образом, введение 0,1% смесового модификатора МКМг19 в стояк формы после предварительной ковшевой обработки расплава чугуна в ковше 2 кг (~ 0,15%) модификатора МК21, вводимого под струю единой порцией, позволяет получить необходимое качество чугуна в отливке.

При внутриформенном графитизирующем модифицировании серого чугуна смесовым модификатором МКМг19 в отливках был обнаружен междендритный графит, цементит в углу сечения при относительно низкой твёрдости – НВ 197-207. Следовательно, внутриформенное графитизирующее модифицирование серого чугуна без предварительной обработки графитизатором в ковше неэффективно и нецелесообразно.

Анализ результатов исследований графитизирующей способности модификатора для встречного модифицирования Glitter показал, что его введение в расплав серого чугуна, модифицированного по серийной технологии, позволяет снизить выделение свободного феррита в микроструктуре чугуна на 5% (с 10% до 5% и с 5% до 0) при неизменной твёрдости НВ 207-217, а также способствует получению наиболее благоприятной морфологии графита – ПГр1 (росту более крупных пластинок графита одинакового размера) и более равномерному его распределению по объёму металлической матрицы. Введение модификатора Glitter в ковш с последующим поздним графитизирующим модифицированием позволяет устранить свободный цементит.

Выводы

1. Установлено влияние лантана на образование большого количества мелких глобул вторичного графита и конгломератов крупных глобул первичного графита, имеющих бимодальное асимметричное статистическое распределение по диаметру включений.

2. При получении ВЧШГ в зависимости от стадийности ввода одного и того же графитизирующего модификатора (ФС55Ба22) происходит изменение механических свойств и морфологии шаровидного графита.

3. Экспериментально доказано, что при графитизирующем модифицировании низкосернистого чугуна модификатором ФС75Ба2,5 морфология графита как в теле отливки, так и в литейной корке (зоне припуска) представлена равномерно распределённой формой ПГр1; при обработке расплава модификатором ФС75СтЦр в литейной корке графит представлен междендритными формами ПГр8, ПГр9.

4. На практике доказано, что позднее графитизирующее модифицирование ВЧШГ литыми быстроохлаждёнными внутриформенными вставками на основе ФС75 с добавками алюминия, кальция и РЗМ позволяет полностью исключить использование графитизирующего модификатора для первичной ковшевой обработки чугуна, а также позволяет получать бесферритную микроструктуру в литом состоянии, соответствующую нормализованной.

5. Исследована эффективность использования всех разновидностей «тяжёлых» лигатур на никель и/или медной основах с позиций модифицирующей и микролегирующей способности.

6. Разработаны и внедрены в производство равнозначные по эффективности технологии получения отливок из ВЧШГ низких марок и ЧВГ – «заливка сверху» и «контейнерная технология».

7. Разработаны и опробованы составы модификаторов для получения отливок из ЧВГ внутрiformенным модифицированием: магнийсодержащего – ФСМг6РЗМ1,5 и безмагниевого – ФС50РЗМ20.

8. Установлены особенности каталитического влияния ПАЭ – Вi и Те – на структурообразование чугунов в зависимости от стадийности ввода с графитизирующим модификатором или без него с целью получения требуемой или стабилизации литой структуры чугуна.

9. Разработаны технологические схемы получения отливок из ВЧШГ высоких марок (свыше ВЧ70) с применением смесевых комплексных модификаторов.

*Дата поступления
в редакцию 24.09.2010*

D. A. Boldyrev

SCIENTIFIC-TECHNOLOGICAL BASES OF MODERN METHODS OF MODIFYING CONSTRUCTIONAL CAST IRONS

On a base of ordering and generalization of data on modifying cast irons in conditions of not modernized manufacture the technologies are created, allowing to lower the cost price of manufacture both already mastered, and new production at maintenance of a required degree of quality, and also to provide increase of special properties of production at the increased requirements to serviceability and a resource.

Key words: cast iron; graphitizing, spheroidizing modifying; microstructure; rich alloy.