

**Анализ основных факторов, определяющих свойства
высокопрочного чугуна с шаровидным графитом**

Студенты гр.10405117 Касперович И.А., Малышко Е.А.
Научные руководители – Слуцкий А.Г., Шейнерт В.А.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск

В настоящее время в Республике Беларусь объемы производства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом расширяются. При этом производятся отливки из невысоких марок ВЧ45-ВЧ50. Актуальным является внедрение технологии получения более высоких марок ЧШГ для отливок ответственного назначения. Выполнен анализ факторов, определяющих свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Химический состав, включая углеродный эквивалент, концентрации вредных примесей и демодификаторов в исходной шихте и полученной отливке, наличие и концентрации легирующих элементов, остаточные концентрации модифицирующих элементов. Для минимизации случайных и постоянных факторов влияния химического состава исходного чугуна на результат сфероидизирующего и графитизирующего модифицирования применяют постоянный контроль состава шихтовых материалов и расплава чугуна по ходу плавки. При получении высоких марок ЧШГ в шихтовых материалах необходимо использовать синтетические чугуны, плавку которых осуществляют на чистых стальных ломах, металлических отходах и карбюризаторах.

Наследственность предыдущего состояния, включая морфологию шихтовых материалов: свежих чугунов, стального и чугунного лома, возврата собственного производства. Этот фактор во многом определяет характер микроструктуры получаемых отливок и устойчивость технологии получения литья из ЧШГ. Для снижения воздействия наследственности в качестве шихты применяют рафинированные чугуны и синтез-плавку исходного высокоуглеродистого сплава.

Модификаторы, как основной фактор, определяющий результаты обработки на шаровидный графит и в большей степени структуру технологического процесса литья. Тип, вид, геометрические параметры, химический состав модифицирующих материалов определяют исходные параметры расплава чугуна, способ ввода их в обрабатываемый расплав, удельный расход, живучесть эффекта модифицирования, определяющего логику литейного цеха и в целом экономику производства ЧШГ. В свою очередь производственная программа и структура литейного цеха определяет необходимость выбора наиболее эффективного модификатора применительно к имеющимся условиям. Во вновь строящиеся литейные цеха или реконструируемые закладываются специализированные сквозные технологии, использующие эффективные серийные модификаторы.

Действующие литейные цеха малых и средних предприятий, осваивающие литьё из высокопрочного чугуна, ориентируются на адаптивные модифицирующие материалы, встраиваемые в действующее производство и требующие изготовления по спецзаказу. В целом для нужд литейного производства разработаны сотни модификаторов чугуна, удовлетворяющих разнообразным условиям производства, однако работы в этом направлении не прекращаются, и сосредоточены на разработках адаптивных материалов, имеющих большую эффективность по результату и экономичность по затратам.

По типу модификаторы для производства ЧШГ делятся на сфероидизирующие и графитизирующие, применение которых неразрывно связано в одном технологическом процессе. В настоящее время функции тех и других частично перекрываются, взаимно компенсируя или дополняя действия друг друга. По виду модификаторы могут быть смесевыми, литыми или композиционными, что определяется способами их изготовления. Наиболее дешёвыми являются смесевые составы, представляющие из себя смеси фракционированных компонентов,

компактированные грануляцией и брикетированием с применением или без связующего. Эффективность их часто недостаточная, расходы повышенные, дымовыделение значительное, однако они позволяют совместить в своём составе вещества несовместимые способом сплавления, например, графит и металлы в больших концентрациях. Наиболее широко представлены литые модификаторы, которые изготавливаются на основе кремния или металлов из ряда Ni, Cu, Al, Fe, Mn. Эти модифицирующие сплавы производятся крупнотоннажными металлургическими технологиями, эффективны, расходы умеренные, особенно при внутриформенном модифицировании, дымовыделение умеренное вплоть до отсутствия, благодаря своим характеристикам они используются в большинстве литейных цехов. Композиционные модификаторы, характерным представителем которых является кокс, пропитанный расплавом магния (процесс модифицирования «МАГ-КОК») имеют малое распространение вследствие сложности и затратности производства, препятствующим массовому выпуску, однако резерв возможностей, открывающийся при использовании подобных модификаторов далеко не исчерпан и может позволить получить высокий результат, недостижимый для традиционных технологий. Ярким примером реализации такого подхода является технология ковшевого модифицирования высокопрочного чугуна порошковой проволокой в промежуточных и разливочных ковшах большой ёмкости, вплоть до 10 тонн. Техпроцесс полностью автоматизирован, усвоение магния высокое, удельный расход проволоки очень мал за счёт наполнителя в виде магнезиевого порошка и стружки, пироэффект незначителен. Геометрические формы приведенных модификаторов могут быть представлены частицами различной формы от округлой при грануляции расплава до осколочной при дроблении слитка, различных фракций от 0,5 мм при графитизации на струю, 1-5 мм при внутриформенном модифицировании до 5-20 мм при модифицировании в крупных ковшах. Разнообразие форм может быть представлено литыми, спеченными и прессованными вставками в реакционные камеры ковшей, надставок и литейных форм. Особую группу по геометрическим параметрам представляют пластинчатые «Чипс»-модификаторы изготовленные способом намораживания на кристаллизатор и модифицирующие порошковые проволоки в металлической оболочке. Такие геометрические формы могут иметь как сфероидизирующие так графитизирующие модифицирующие материалы. Химический состав модифицирующих композиций достаточно широк и определяется целым рядом параметров, таких как маркой и типом ЧШГ химсоставом и температурой исходного расплава, способом модифицирования, принятым на производстве, способом изготовления модификатора, термообработкой отливок, экономическими требованиями и многими другими. Основными группами компонентов являются активные элементы, такие как щелочноземельные и редкоземельные металлы: магний, кальций, стронций, барий, церий, лантан, иттрий и т.д.; легирующие элементы: никель, медь, марганец; носители – элементы, составляющие основу сплава и снижающие интенсивность кипения активных элементов: алюминий и кремний; разбавляющие и утяжеляющие элементы, как правило железо. Целый ряд химических элементов, составляющих модификаторы совмещают функции, например, медь – утяжелитель и легирующее; никель – носитель, утяжелитель и легирующее; кремний – носитель и легирующее. К тому же необходимо учитывать, что многие элементы совмещают функции сфероидизации и графитизации, например, магнезиевые модификаторы на основе никеля и меди работают на структуру жёстко (перлитная матрица, точечный графит, структурно свободный цементит и т.д.), а композиции на основе кремния работают мягко (феррит, высокое удлинение, большая площадь шлифа, занимаемая графитом и т.д.).

Важным фактором является способ модифицирования исходного чугуна, который определяет не только физические свойства и марку получаемого чугуна, но и является ядром всего производства ЧШГ. Из основных способов сфероидизирующей обработки чугуна можно выделить два основных: ковшевое и внутриформенное модифицирование. В группе ковшевых технологий можно выделить автоклавные процессы обработки расплава чистым магнием под внешним избыточным газовым давлением и вариант представленный конвертором Фишера, в

котором реакция идёт под избыточным давлением паров магния. Не смотря на высокую эффективность обработки (высокие марки, дешевизна модификатора, малый расход) такие способы в настоящее время не применяются из-за аппаратурной сложности, длительности, плохой технологической гибкости и непроизводительности.

Самыми распространёнными способами ковшевого модифицирования ВЧ являются варианты «Сэндвич – процесса», когда порция модификатора закладывается в ковш перед заливкой. Группа этих технологий использует закрытые и открытые ковши специальной конструкции или обычные разливочные ёмкостью до нескольких тонн, чаще не более 1 тонны. Закрытые ковши могут иметь герметизируемую и негерметизируемую крышку для сокращения угара магния и устранения пироэффекта, однако требуют выполнения в специальной конструкции, сложны в транспортной логистике и обслуживании, создают технологические задержки, увеличивают потери тепла расплава. Открытые ковши просты в технологическом использовании, обеспечивают лёгкое согласование темпов работы оборудования, простую логистику, универсальны в случае использования в цехе нескольких сплавов (серые, легированные и высокопрочные чугуны), однако дают значительный пироэффект и недостаточно стабильный результат обработки. Тем не менее, простота применения, универсальность и малая затратность обеспечили «Сэндвич – процессу» широкое распространение. Отдельно необходимо отметить вышеупомянутые способы ковшевого модифицирования чугуна проволочными модификаторами, осуществляемые на специальных автоматизированных закрытых стендах, позволяющих рассчитывать параметры и контролировать процесс по ходу реакции (вес исходного расплава, скорость подачи, количество подачи, температура, время и т.д.). Дымовыделение в атмосферу цеха в этом случае полностью исключается, повторяемость отличная, экономика хорошая, однако такую технологию эффективно можно использовать в мощных цехах с массовым конвейерным производством и объёмом разового выпуска расплава не менее 5-6 тонн. Капитальные затраты при реализации процесса высоки.

Группа технологий внутриформенного модифицирования представлена в основном способом обработки в выносной реакционной камере с последующей заливкой в литейную форму для изготовления крупных отливок весом до нескольких тонн и классическим «Инмолд – процессом», в котором сфероидизирующая обработка расплава происходит в реакционной камере литейной формы и совмещена с процессом заполнения её полости. Такие технологические процессы абсолютно бездымны и могут быть полностью автоматизированы, дают высокую повторяемость и стабильность результатов, применимы как в массовом, конвейерном производстве, так и в мелкосерийном, однако требуют высокого качества модификаторов и сложных расчётов в технологии формы, необходимых в отдельности для индивидуальной отливки. К тому же сниженный «выход годного» часто оправдывается только на больших производственных сериях.

Режим кристаллизации залитого в форму модифицированного расплава оказывает на структуру и свойства ЧШГ особенно сильное влияние, вследствие некоторых особенностей таких чугунов, в частности, повышенной объёмной и линейной усадкой, чувствительностью свойств к объёму занимаемому графитной фазой, высокой склонностью к переохлаждению и соответственно к отбелу. Вследствие этого направление и скорость кристаллизации являются определяющими для литой макро и микроструктуры отливок, режимов термообработки литья и целого ряда служебных свойств деталей из высокопрочного чугуна. В целом можно отметить, что подавляющее большинство отливок из ЧШГ изготавливаются литьём в песчаные и керамические формы с умеренным темпом охлаждения отливки, которые позволяют получить феррито-перлитную основу в структуре. Однако есть случаи, когда отливки необходимо получать отбелёнными, для получения специальной структуры в процессе отжига, в этом случае заливка производится в металлические формы с различной толщиной теплоизоляционного слоя и с высоким темпом охлаждения. Как правило в кокиль отливают литьё мелкого и среднего развеса не требующего организации сложной литниково-питающей системы и из безуса-

дочных высококремнистых марок. Для получения в литье специальных структур высокопрочного чугуна, таких как аустенитная, мартенситная, бейнитная необходима организация сложного теплового режима формы, повышенный теплоотвод и теплоизоляцию в различные периоды охлаждения. В целом, кристаллизация отливок из ЧШГ должна быть направленной для устранения усадочных дефектов и с умеренным темпом, позволяющим достаточно полно пройти процесс графитизации, но с другой стороны достаточным для получения однородной структуры по толщине стенки отливки, которую в случае высокопрочного чугуна стараются уменьшить до предела, вследствие высокой прочности материала и склонности к неоднородности формы и распределения графита по сечению отливки. Маневрирование, за счёт темпа кристаллизации, соотношением этих встречных факторов в разных частях отливки позволяет получить требуемые свойства для различных элементов будущей детали.

Термообработка отливок из ЧШГ наряду с вышеперечисленными, является действенным фактором влияния на микроструктуру литого чугуна с целью получения заданных характеристик готовых изделий. Практически весь объём литья из высокопрочного чугуна проходит цикл термической обработки, что связано с особенностями кристаллизации чугуна, модифицированного на шаровидный графит. В литом состоянии высокопрочного чугуна затруднительно обеспечить получение требуемой микроструктуры, механических свойств и размерной стабильности отливок. Для литья из ЧШГ применяют следующие виды термической обработки: низкотемпературный отжиг, высокотемпературный отжиг, нормализация, объёмная закалка, изотермическая закалка, поверхностная закалка, термоциклическая и термомеханическая обработка, химико-термическая обработка. Подавляющее количество отливок проходят низкотемпературный отжиг (до 650 °С) для снятия термических напряжений, ферритизации матрицы и дополнительной графитизации. Эта термическая операция является конечной стадией в цепи других высокотемпературных обработок. Для низких марок ВЧ часто достаточно одного низкотемпературного отжига. Высокотемпературный отжиг проводят для разложения структурно-свободных карбидов, которые резко снижают механические свойства и обрабатываемость отливок, такая обработка проводится для белых высокопрочных чугунов с целью графитизации. Нормализация с различным темпом охлаждения (спокойный воздух, обдув, аэрозоли и т.д.) проводится для получения перлитной структуры основы чугунов и обязательная операция для ответственных, нагруженных деталей, например, коленчатые валы двигателей, компрессоров. Объёмная закалка отливок из ЧШГ позволяет получать матрицу чугуна, состоящую из продуктов мартенситного превращения: мартесита, бейнита, остаточного аустенита и их смесей. Выбором химического состава и скорости охлаждения при закалке можно получать требуемые структуры закалки в широком диапазоне соотношения составляющих. Отдельным вариантом объёмной закалки является изотермическая закалка отливок в высокотемпературных средах (250-500 °С), как правило соляных или свинцовых ваннах. Процедура применяется для чугунов высоких марок ВЧ70-ВЧ100, легированных элементами, тормозящими перлитное превращение, обычно сочетанием никеля, меди, молибдена, марганца, для получения бейнитной структуры обеспечивающей наилучшее сочетание прочностных и пластических свойств в готовых деталях. Характерными примерами таких деталей являются шестерни передач и коленчатые валы форсированных двигателей внутреннего сгорания. Поверхностная закалка со скоростным нагревом пламенем или токами высокой частоты применяется как финишная термообработка деталей ВЧ подвергающихся износу в парах трения или абразивному износу в процессе эксплуатации и производится, но готовых деталях, обработанных под финишные операции. Поверхностной закалке на глубину 1-5 мм подвергаются шейки и цапфы валов, поверхности подшипников, ползунов, подпятников, детали ходовой части и орудия машин. Поскольку аустенизация при скоростном нагреве должна завершиться за очень короткое время, скоростной закалке подвергаются чугуны исключительно с перлитной структурой, получаемой предварительной термообработкой для перлитизации матрицы или легированные чугуны имеющие перлитную основу в литом состоянии. Термоциклическая и термомеханическая обработка применяется в редких случаях вследствие сложности и высокой

стоимости для отливок особого назначения для обеспечения особенно высоких показателей механической прочности и жесткости. Термоциклическая обработка включает многократный нагрев и охлаждение в определённом температурном интервале приводящим к термическому наклёпу структуры и увеличению прочности и твёрдости материала отливки, таким приёмом возможно добиться разрывной прочности вплоть до 1200 МПа и сокращения разбега между временным сопротивлением на разрыв и пределом текучести. Химико-термическая обработка, носящая характер поверхностного воздействия, применяется к отливкам из ВЧШГ в редких случаях для придания поверхности деталей особых свойств, таких как износостойкость, коррозионная устойчивость и окалиностойкость при повышенных температурах. Обычно применяют процессы алитирования, хромирования, борирования, азотирования, хромирования, силицирования и сульфидирования придающие поверхностным слоям деталей особые служебные свойства при сохранении структуры сердцевины изделий аналогичной необработанному чугуна.