

массой жидкого металла 7–9 т практически установлена и считается достаточной толщина пластины 20 мм. Площадь пластины примерно в 10 раз должна превышать площадь сечения трубы. Толщина стенки трубы, как показала практика, должна превышать 10 мм. Необходимые трубы при промышленных заливках подбирались из отходов и перед использованием подвергались очистке. Химический состав пластины и трубы для отливок из нелегированных сталей в расчет не принимался.

При выполнении указанных выше факторов и параметров обеспечивалась спокойная заливка без разбрызгивания металла, особенно на первом этапе заливки. По мере повышения уровня металла в форме происходило расплавление пластины и трубы несколько ниже поднимающегося уровня зеркала расплава в полости литейной формы и очередные свежие порции его поступали непосредственно в верхние горизонты заполняющего форму металла. Описанный способ можно рассматривать как заливку сверху через расходуемый металлопровод.

**В. С. Ивлиев,  
В. Б. Польш**

## **СТРУКТУРНЫЕ ОСНОВЫ И МЕХАНИЗМ ПРОТЕКАНИЯ ПРЕДУСАДОЧНОГО РАСШИРЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ**

При затвердевании и формировании отливок из чугуна с шаровидной формой графита (ЧШГ) одновременно с термической усадкой протекают процессы графитизации, сопровождаемые увеличением удельного объема чугуна как в жидком, так и в твердом состояниях. Сосуществование этих процессов определяет суммарное изменение объема залитой отливки, удельной плотности чугуна, образование усадочных дефектов, горячих и холодных трещин и других дефектов.

Соотношение процессов графитизации в жидком и твердом состояниях зависит от многих факторов, управление которыми способствует получению отливок требуемого качества. При изготовлении отливок из ЧШГ появляется ряд специфических сильнодействующих факторов: степень рафинирования расплава, уменьшение содержания углерода и серы, степень усвоения введенного при модифицировании магния и кремния, наличие демодификаторов, карбидостабилизирующих элементов и др. Некоторые из этих факторов существенно увеличивают склонность чугуна к метастабильной кристаллизации, образованию вышеуказанных дефектов и требуют проведения определенных технологических мероприятий по их предотвращению.

При получении метастабильной структуры со свободным цементитом в отливках из ЧШГ, содержащего карбидостабилизирующие элементы ( $Mn$ ,  $(r)$ ), даже длительный высокотемпературный графитизирующий и гомогенизирующий отжиг не позволяет избавиться от внутрикристаллической ликвации этих элементов, а также кремния, который параллельно образует свои ликвационные зоны. Эти зоны значительно ухудшают показатели механических свойств и не раскрывают потенциальных возможностей получения высокой пластичности и вязкости в отливках из ЧШГ.

Ограниченная гомогенизация при высокотемпературном отжиге связана с меньшей диффузионной способностью элементов, образующих твердые растворы замещения, по сравнению с углеродом, который образует твердый раствор внедрения. Ликвационные зоны карбидостабилизирующих элементов обычно совпадают после графитизации по месту с образовавшимися при затвердевании карбидами. Кристаллизация при затвердевании ЧШГ стабильной структуры без свободного цементита – залог получения максимально возможных показателей пластичности и вязкости.

Факторы плавки и внепечной обработки оказывают решающее влияние на перераспределение процессов графитизации в жидкой и твердой фазах при затвердевании отливок в литейной форме. Графитизация в жидкой фазе жидко-твердой области температурного интервала кристаллизации вызывает увеличение удельного объема этой фазы, уменьшает объемную усадку, способствует улучшению питания отливки, уменьшению объема и даже ликвидации усадочных дефектов.

Аналогичный эффект обуславливает графитизация внутри кристаллитов твердой фазы, находящихся в окружении жидкой фазы. Графитизация же в объеме твердой корочки затвердевшего металла при формировании чугуновых отливок сопровождается так называемым предусадочным расширением, при котором увеличивается объем отливки, возникает дефицит жидкого металла, находящегося внутри твердой оболочки, и образуются усадочные дефекты. Чем больше величина предусадочного расширения, тем больше вероятность появления этих дефектов.

В механизме протекания предусадочного расширения до настоящего времени еще многое является спорным и неясным, особенно в отношении моментов начала и окончания, абсолютной величины, изменения его скорости, а также влияния различных технологических факторов, особенностей взаимодействия с поверхностью литейной формы и т.п. Часто при объяснении причин возникновения предусадочного расширения ограничиваются указаниями на уменьшение плотности чугуна в результате протекания процесса графитизации, которая сама является следствием сложных физико-химических процессов и объектом множества гипотез о механизме ее протекания.

При кристаллизации чугуна после выделения первичных дендритов аустенита происходит формирование эвтектики. При возникновении стабильной аустенитно-графитной эвтектики инициирующей фазой является графит, на по-

верхности которого зарождается и растет в контакте с жидкой фазой аустенит, постепенно обволакивая включения графита и изолируя их от расплава.

В ЧШГ рост графитного сферолита большей частью происходит внутри аустенитной оболочки за счет диффузионного притока атомов железа и других элементов. Окружающая жидкая фаза в это время обогащается ликватами, т.е. элементами, обладающими ограниченной растворимостью в аустените (углерод, сера, фосфор и др.) по сравнению с жидкой фазой. Между жидкой фазой и аустенитом возникают определенные концентрационные градиенты этих элементов. Рост графитного включения в окружении аустенита происходит за счет атомов твердого раствора, равновесная концентрация углерода в котором может восстанавливаться только из внешних источников.

Вторая причина роста графитного включения – это наличие механизма присоединения атомов углерода к графиту. Во многих теориях рост включения графита рассматривается изолированно от окружающей твердой фазы или за счет самодиффузии атомов железа в твердом растворе от поверхности графита и постепенного перемещения граничной поверхности в сторону твердого раствора. Данная трактовка объясняет предвзвешенное расширение как простое растяжение аустенитной оболочки, хотя такое расширение следовало бы интерпретировать на основе физических представлений о расширении материалов, например при нагреве.

Принципиально рост графитного включения в окружении аустенита или другого твердого раствора возможен при наличии на граничной поверхности пустот, в частности вакансий в узлах кристаллической решетки твердого раствора. По физическим представлениям в кристаллической решетке всегда имеется определенная концентрация вакансий, которая является функцией температуры и возрастает с ее увеличением. Эти вакансии непрерывно перемещаются по узлам кристаллической решетки и находятся в тесной связи с диффузией атомов железа и других химических элементов, образующих твердые растворы замещения.

Можно предположить, что уходящий с граничной поверхности атом занимает соседнюю вакансию в решетке твердого раствора, а атомы углерода заполняют образовавшуюся вакансию и присоединяются к включению графита. В результате такого обмена происходит уменьшение концентрации вакансий при неизменных температурных условиях. Это, по-видимому, автоматически должно приводить к восстановлению равновесия между концентрацией вакансий и энергетическим состоянием системы, т.е. образованию новых вакансий и увеличению объема («разрыхления») аустенитного кристаллита помимо его внешнего роста за счет присоединения строительного материала из жидкой фазы. Такое «разрыхление» имеет в какой-то степени ту же природу, что и тепловое расширение.

Равновесная концентрация углерода в аустените по мере убыли его на графитизацию непрерывно пополняется за счет диффузии его из жидкой фазы и других источников углерода, например высокоуглеродистых твердых фаз. На

заклочительных этапах затвердевания колонии эвтектики входят в соприкосновение, образуя жесткий каркас и сплошную корочку твердого металла, состоящую из конгломератов первичных дендритов аустенита, сферических зерен аустенитно-графитной эвтектики, а также межзеренных и междендритных прослоек ликватов и неметаллических включений.

Именно с момента образования жесткого каркаса за счет продолжающегося «разрыхления» может реализоваться увеличение линейных размеров отливки, оказывающее силовое воздействие на поверхность литейной формы помимо ферростатического напора расплавленного металла.

Предусадочное расширение проявляется как разница термического сжатия и объемного расширения аустенитных оболочек при затвердевании и последующем охлаждении отливки до тех пор, пока сохраняется поток атомов углерода как источник графитизации и генератор вакансионного расширения аустенитных оболочек вокруг включений графита.

При кристаллизации эвтектических колоний с пластинчатой формой графита большая часть углерода присоединяется к графиту непосредственно из жидкой фазы, в это время механизм вакансионного расширения, по-видимому, реализуется только при поперечном росте пластинок графита в обрамлении аустенита.

Если при первичной кристаллизации наряду с аустенитно-графитными эвтектическими колониями образуются и ледебуритные, то предусадочное расширение может резко возрастать, особенно в твердом состоянии после эвтектического превращения. Так, В. П. Чернобровкин наблюдал в половинчатом чугуна с пластинчатой формой графита предусадочное расширение до 1,5 % по сравнению с обычным для серого чугуна 0,12–0,2 %. Наконец, в белом чугуна заметного предусадочного расширения обычно не наблюдается, однако при графитизирующем отжиге происходит ожидаемое расширение с уменьшением плотности чугуна, что следует учитывать при проектировании модельной оснастки.

Бытует мнение, что при формировании отливок из ЧШГ усадочные изменения занимают промежуточное положение между отливками из серого и белого чугунов. С этим можно согласиться в том случае, если при первичной кристаллизации формируется половинчатая структура, что обычно имело место на первых этапах освоения производства отливок из этого чугуна с заключительным высокотемпературным графитизирующим отжигом.

При кристаллизации ЧШГ по стабильной системе изменение плотности должно быть аналогичным ее изменению в серых чугунах с пластинчатой формой графита, следовательно, предусадочное расширение должно приближаться по величине к таковому для серого чугуна.

Такой вывод подтверждает полунепрерывная отливка тонкостенных труб из ЧШГ со стабильной структурой в водоохлаждаемые стальные внутренний и наружный кристаллизаторы, продольные профили которых должны при определенных скоростях извлечения отливки соответствовать объемным изменени-

ям формирующихся наружной и внутренней твердых корочек чугуна, т.е. предусадочному расширению и последующей усадке.

Массовая отливка этих труб показала невозможность практической реализации процесса при использовании чугуна, склонного при затвердевании к половинчатой кристаллизации. Положительные результаты удалось достичь только при интенсивном тройном графитизирующем модифицировании при вводе части мелкодробленого модификатора непосредственно в струю металла при заливке в кристаллизатор.

При этом большая часть углерода графитизировалась в виде дисперсных сферолитов (рисунок) еще в жидко-твердом состоянии, т.е. до образования жесткого каркаса. Использовались обычные профили кристаллизаторов, применяемые для отливки труб из чугуна с пластинчатым графитом. В результате резко уменьшился брак по горячим и холодным трещинам и другим специфическим для непрерывного литья дефектам (сдвиг корки, спай, ужимины и т. д.), которые возникают при несоответствии развития предусадочного расширения профилю кристаллизатора. Трубы в литом состоянии не имели структурно свободного цементита, отличались высокими механическими свойствами, не нуждались в высокотемпературном графитизирующем отжиге.

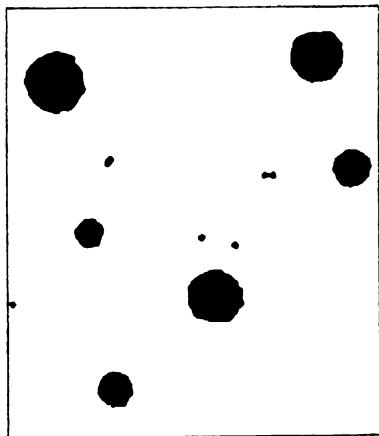
Таким образом, было установлено, что эффективное воздействие на процесс графитизации прежде всего в жидко-твердом состоянии оказывает решающее влияние на характер предусадочного расширения. При производстве труб из ЧШГ, получаемых полунепрерывным способом в водоохлаждаемом кристаллизаторе, при наличии в их структуре структурно свободного цементита резко увеличивается брак по трещинам, а на внутренней поверхности, вследствие образования чрезмерного газового зазора между формирующейся трубой и внутренним кристаллизатором как результата предусадочного расширения, возникают вдоль трубы дефекты в виде глубоких извилистых борозд, так называемые ужимины.

С целью эффективного воздействия на процессы графитизации и предусадочного расширения чугуна были опробованы способы двойного (ввод части ферросилиция до обработки магнием, а другой части – в заливочный ковш перед заливкой в кристаллизатор) и тройного модифицирования (ввод дополнительной части ферросилиция в заливочный желоб установки полунепрерывного литья).

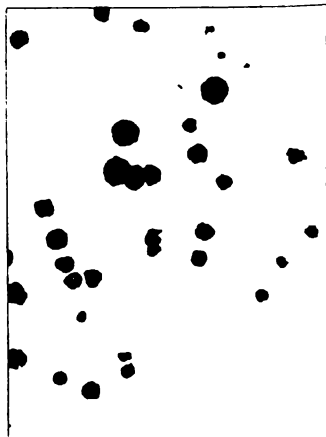
На рисунке показано, что при двойной схеме модифицирования графит выделяется в виде крупных сферолитов, расположенных на достаточно большом расстоянии друг от друга, а при тройном модифицировании образуется большое количество мелких равномерно распределенных сферолитов графита.

При получении труб, модифицированных по двойной схеме, не удавалось полностью ликвидировать указанные выше дефекты, что, однако, было реализовано при тройном модифицировании. Кроме того, в последнем случае в структуре труб практически отсутствовали включения свободного цементита и наблюдалось большое количество феррита.

а



б



Включения графита в чугунах труб из ЧШГ:

а — при двойном модифицировании; б — при тройном модифицировании

Использование при отливке труб профилей кристаллизаторов (наружного и внутреннего), применяемых и для отливки из серого чугуна с пластинчатым графитом, свидетельствует о близких характеристиках предсадочного расширения труб из этого чугуна и труб из ЧШГ после тройного модифицирования. Соответствующее качество труб и характер их микроструктуры подтверждают положение о протекании графитизации большей части углерода в жидко-твердом состоянии в ущерб графитизации и соответствующему предсадочному расширению в твердой корочке затвердевшего чугуна.

Весьма вероятно, что при изготовлении даже тонкостенных отливок из ЧШГ с использованием внутриформенного модифицирования происходят аналогичные процессы графитизации без образования эвтектического цементита.