

Литейное материаловедение, специальные способы литья

The description of conditions of the formation excluding formation of shrinkage cavities and porosity in castings is given, the analysis of dynamics of change of specific heat flow rate and freezing rate of cast iron during formation time is resulted, influence of preshrinkage expansion of cast iron on geometrical parametres of castings is shown.

В. Ф. БЕВЗА, Е. И. МАНУКОВИЧ, В. П. ГРУША, ГНУ ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74.047

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ В УСЛОВИЯХ ПРИСТЕНОЧНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В последние десятилетия в промышленно развитых странах литейное производство, снизив объемы выпуска отливок, стало технически более сложным. Тенденция его развития характеризуется требованием значительного повышения качественного уровня отливок, что, в первую очередь, связано с разработкой новых и совершенствованием существующих способов литья и применением конструкционных материалов, обладающих более высокими эксплуатационными характеристиками.

Из всех литейных сплавов чугун наиболее широко применяется в промышленности, его потенциальные возможности далеко не исчерпаны. Чугун с шаровидными включениями графита (ЧШГ), приближающимся по механическим свойствам к литой стали, а в некоторых случаях и превышающий их, является одним из самых перспективных литейных материалов.

Основной задачей при разработке технологии литья ЧШГ является поиск путей повышения технологичности этого сплава применительно к каждому конкретному способу получения отливок. Наряду с такими проблемами как устранение усадочных дефектов и отбела понятие технологичности ЧШГ включает также вопросы, связанные с подготовкой расплава к модифицированию и самой операцией модифицирования. На конечный результат значительное влияние оказывает технология предварительной подготовки расплава, сфероидизирующей и вторичной послесфероидизирующей обработки чугуна.

Одним из методов улучшения качества отливок и повышения уровня механических свойств материала является применение специальных технологических процессов литья, среди которых наиболее перспективны техпроцессы, основанные на использовании принципа направленного затверде-

вания металла. В связи с этим актуально дальнейшее развитие разрабатываемого в ИТМ НАН Беларуси нового эффективного способа получения полых заготовок типа втулок без применения стержня методом направленного затвердевания [1].

Затвердевание металла является наиболее важным этапом, определяющим условия формирования отливки. В этот период образуются такие дефекты литой заготовки, как усадочные (газоусадочные) раковины, пористость, горячие трещины и т. п. Жидкий ЧШГ, как и другие расплавы, при охлаждении уменьшается в объеме до температуры начала эвтектического превращения. Затем объемная кристаллизация, к которой склонен ЧШГ, приводит к расширению чугуна вплоть до окончания процесса затвердевания, после чего размеры отливки уменьшаются по мере охлаждения до комнатной температуры.

Считается, что появление сосредоточенных усадочных раковин в отливках из ЧШГ – следствие предусадочного расширения, так как увеличение объема, которое для ЧШГ в 3–4 раза больше, чем для чугуна с пластинчатым графитом (ЧПГ), внутри корки не компенсируется притоком жидкого металла [2]. Экспериментальные значения этого параметра составляют 0,6–1,2% для ЧШГ и 0,2–0,6% для ЧПГ [3]. В связи с этим при разработке технологии необходимо предусматривать хорошее питание отливок из ЧШГ и по возможности снижение податливости формы. Для реализации этих требований создаются специальные литниково-питающие системы с использованием прибылей. При этом необходимо, чтобы перемерзание шейки, соединяющей прибыль с отливкой, происходило не раньше, чем затвердеет отливка, так как в противном случае прибыль перестанет питать отливку. Однако рассчитать все этапы затвердевания

и создать оптимальную литниково-питающую систему пока практически невозможно [4].

В оптимальном варианте проблема питания отливки решается при получении полых цилиндрических заготовок методом пристеночной кристаллизации (намораживания) в непрерывно-циклическом режиме литья. При этом методе питание отливок перегретым расплавом надежно обеспечивается за счет применения эффективной принципиальной схемы литья. Эта схема в принципе исключает дефицит жидкой фазы при затвердевании металла. Сущность ее заключается в том, что формирование отливки происходит в условиях, при которых объем затвердевающего металла всегда меньше объема расплава, залитого в кристаллизатор. В этом случае в течение всего времени затвердевания реализуется явление, обозначаемое термином «сплошное питание», которое характеризуется тем, что образующиеся дендриты сначала со всех сторон окружены расплавом. Вследствие этого происходит постоянная подпитка, компенсирующая усадку за счет перемещения как жидкой, так и твердой фаз. Затем дендриты аустенита и эвтектические зерна, увеличиваясь в размере, соприкасаются, образуя сначала отдельные агрегаты, а затем и сплошную массу сросшихся кристаллов, между которыми остается расплав. Причем если при традиционных способах литья подпитка жидким металлом этих объемов расплава затруднена, что приводит к появлению в отливке усадочных дефектов, то при литье намораживанием подпитка междендритного пространства осуществляется автоматически в течение всего времени затвердевания отливки за счет избыточного объема перегретого расплава, постоянно находящегося в осевой части кристаллизатора. Это и обеспечивает «сплошное питание» фронта затвердевания кристаллизующегося сплава.

Процесс литья осуществляют следующим образом. Жидкий металл заливают в вертикально расположенный кристаллизатор сифоном до его заполнения на всю высоту и делают выдержку. За счет интенсивного радиального теплоотвода в пристеночной зоне внутренней поверхности кристаллизатора начинается затвердевание металла и рост твердой корочки в радиальном направлении равномерно по всему периметру и высоте. При этом в течение всего времени затвердевания отливки в центральной зоне кристаллизатора постоянно находится перегретый расплав, контактирующий со всей внутренней поверхностью затвердевающей корки. Эта масса перегретого расплава выполняет функцию прибыли и обеспечивает обильное питание фронта затвердевания жидкой фазой. При-

чем это питание осуществляется под давлением, обусловленным металлостатическим напором столба перегретого расплава, равного высоте кристаллизатора. После намораживания заданной толщины металл, затвердевший в пристеночной зоне кристаллизатора, полностью извлекают из кристаллизатора и расплава вверх, а в кристаллизатор одновременно с извлечением подают новую порцию жидкого металла, равную объему извлеченной корки, которая и составляет тело отливки. При извлечении затвердевшей корки освобождающийся объем автоматически заполняется жидким металлом, находящимся в центральной части кристаллизатора, и начинается формирование следующей отливки. Цикл повторяется.

Таким образом, при формировании отливок типа втулок по описанной схеме образование усадочных раковин и пористости практически исключается. Кроме того, обеспечивается требование по максимально быстрому заполнению формы расплавом. Если при традиционных способах литья отливку массой 5 кг рекомендуют заливать не более чем за ~4 с [5], то при литье намораживанием это происходит в течение не более 1,5 с, т. е. в течение времени извлечения сформированной отливки из кристаллизатора.

Одним из способов исследования процессов непрерывного литья, позволяющих изучить особенности формирования отливки, является определение температурного поля кристаллизатора, что дает возможность рассчитать величину тепловых потоков, отводимых с поверхности отливки, и оценить условия затвердевания металла.

При установившемся режиме литья температура рабочей поверхности кристаллизатора колеблется около некоторого среднего значения, которое при неизменяющихся технологических параметрах остается практически постоянной. Амплитуда колебания температуры на водоохлаждаемой поверхности в несколько раз меньше, чем на рабочей, и при расчетах без большой погрешности может быть принята постоянной. Таким образом, в течение формирования каждой отливки стенка кристаллизатора работает в условиях нестационарного изменения температуры, а так как эти циклы повторяются в течение всего времени разлива, то процесс можно определить как стационарно периодический. Поэтому исследование изменения температуры кристаллизатора в течение одного цикла дает исчерпывающую информацию о тепловом состоянии его работы в течение всего процесса разлива.

Расчет температурного поля кристаллизатора и удельного теплового потока (q_1) производили по

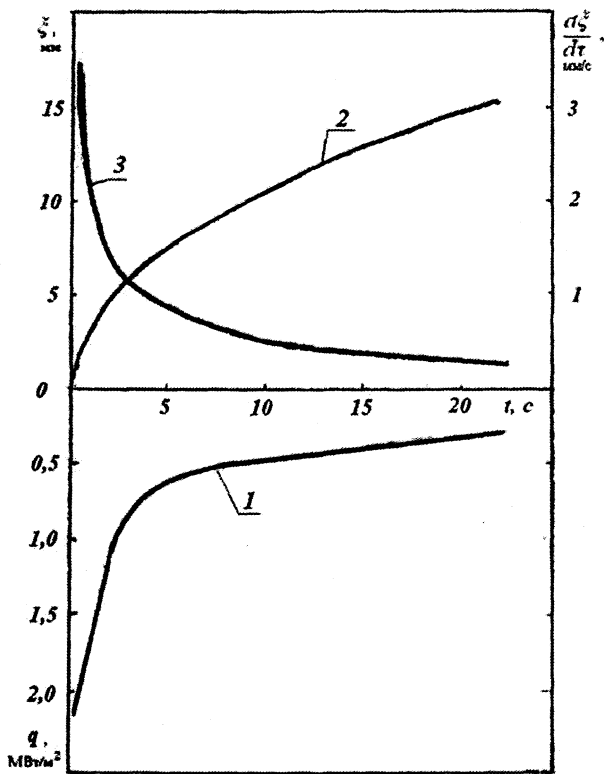


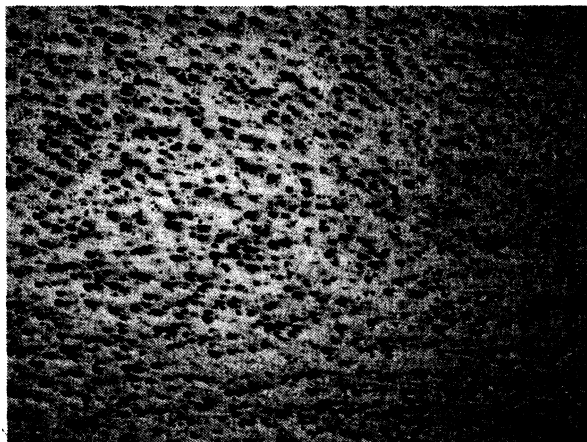
Рис. 1. Изменение удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора (1), толщины стенки отливки (2) и скорости затвердевания чугуна (3) в течение времени формирования

упрощенной методике решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ) [6, 7]. Процесс затвердевания рассчитывали по формулам, приведенным в работе [8].

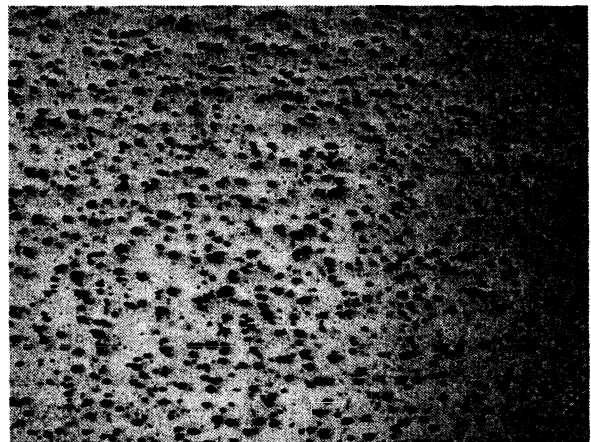
При проведении расчетов принимались следующие значения теплофизических коэффициентов [9, 10]: $\rho_1 = 7200 \text{ кг/м}^3$; $L_1 = 259,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$; $\lambda = 37 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$; $C_1' = 840 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$; $C_1 = 750 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$; $T_{\text{сол}} = 1140 \text{ }^\circ\text{C}$.

Технологические исследования и расчеты показывают, что условия затвердевания металла в основном определяются величиной и характером изменения теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора. В течение времени затвердевания отливки (~20 с) изменение теплового потока происходит в пределах от 2,0–2,5 МВт/м² в момент контакта кристаллизатора с жидким металлом до 0,3–0,5 МВт/м² к моменту извлечения отливки (рис. 1, кривая 1). Соответственно наружные слои затвердевают с максимальной скоростью (рис. 1, кривая 3). По мере удаления фронта затвердевания от теплоотводящей поверхности (стенки кристаллизатора) скорость кристаллизации существенно снижается и при толщине затвердевающей корки около 10 мм не превышает 0,5 мм/с (рис. 1, кривая 2 и 3). Однако, несмотря на резкое падение скорости затвердевания в начальный момент, она остается достаточно большой в течение всего времени формирования отливки, что определяет высокую дисперсность металлической матрицы и графитовых включений.

Вследствие того что наружные слои отливки, непосредственно примыкающие к водоохлаждаемой стенке кристаллизатора, затвердевают с большей скоростью, чем последующие, то сфероиды графита в наружной зоне заметно меньше, чем в средней и внутренней зонах по толщине стенки отливки (рис. 2). При этом практически во всех случаях форма графита соответствовала ШГф5 и ШГф4, а дисперсность составляла 15–45 мкм и существенно не зависела от применяемого модификатора. Что касается металлической матрицы, то ее наружные слои также более дисперсны, чем внутренние. Однако ее фазовый состав зависит не только от скорости затвердевания, но и от условий охлаждения отливки вне кристаллизатора.



а



б

Рис. 2. Форма и размеры графита в наружной (а) и средней (б) зонах по толщине стенки отливки. $\times 100$

Как уже отмечалось, при литье заготовок из ЧШГ они могут изменять свой размер за счет предусадочного расширения. Степень изменения линейных и объемных размеров отливки из ЧШГ в результате предусадочного расширения зависит от массы отливки, времени затвердевания и является результатом силового взаимодействия формы и затвердевающего металла.

Усилие, которое испытывает форма при затвердевании ЧПГ, составляет 98-137 Н, при этом давление равно 0,14-0,2 МПа. Для затвердевающего ЧШГ это усилие в 5 раз выше и составляет 490-686 Н, что соответствует давлению 0,7-1,0 МПа [5]. Это приводит к значительному увеличению размеров отливки при литье в сырые песчаноплинистые, стержневые и другие податливые формы.

Анализ наружных размеров отливок из ЧШГ, полученных литьем в стальной водоохлаждаемый кристаллизатор, показал, что средняя величина диаметра отливок при комнатной температуре в нижнем и верхнем сечениях соответственно на 0,3 и 0,6% меньше диаметра кристаллизатора при той же температуре. Это свидетельствует о том, что предусадочное расширение отливок не проявляется при затвердевании расплава в неподатливой форме. Максимальный разброс значений диаметра отливок на нижнем торце составил 0,52% (0,5 мм), на верхнем - 1,04% (1 мм).

Кристаллизатор имел следующие размеры внутренней полости при комнатной температуре: в нижнем сечении $D_1 = 95,5$ мм, в верхнем - $D_2 =$

97,6 мм, в среднем сечении по его высоте $D_{cp} = 96,55$ мм. Следует отметить, что конусность наружной поверхности отливок находилась в пределах 1,85-1,87%, что на 14,2% меньше конусности кристаллизатора, которая составляла 2,175% $\left(K = \frac{D_2 - D_1}{D_{cp}} \cdot 100\% \right)$. Это положение способствует свободному извлечению отливки из кристаллизатора и обеспечивает стабильность процесса в течение всего времени разливки.

Таким образом, при получении заготовок из ЧШГ методом пристеночной кристаллизации образование усадочных раковин и пористости исключается за счет принципиальной схемы, на основе которой разрабатывается технология литья. При этом обеспечивается требование по максимально быстрому заполнению формы расплавом. Благодаря высокой интенсивности одностороннего радиального теплоотода от отливки чугуна имеет градиентную плотную мелкодисперсную структуру с графитом ШГф5, ШГф4. Предусадочное расширение, присущее ЧШГ, практически не проявляется в отливках, полученных при литье в металлический водоохлаждаемый кристаллизатор. Поэтому кристаллизатор следует выполнять с размером, соответствующим диаметру отливки. При этом отклонение величины ее диаметра в меньшую сторону не превышает 0,6%. Это следует учитывать при назначении припуска на механическую обработку.

Литература

1. Ефимов В. А., Анисович Г. А., Бабич В. Н. и др. Специальные способы литья: Справ. М.: Машиностроение, 1991.
2. Bates G. E., Oliver G. L., Mcswain R. H. Volumetric changes during freising of ductile cast iron Jbid., 1977. Vol. 85. P. 289-298.
3. Неижко И. Г. Графитизация и свойства чугуна. Киев: Наукова думка, 1989.
4. Худокормов Д. Н. Производство отливок из чугуна. Мн.: Выш. шк., 1987.
5. Захарченко Э. В., Левченко Ю. Н., Горенко В. Г., Вареник П. А. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. Киев: Наукова думка, 1986.
6. Балаковский С. А., Бевза В. Ф., Попов В. Б. Идентификация теплового нагружения кристаллизатора при литье намораживанием // Моделирование и оптимизация процессов промышленных технологий: Сб. науч. тр. Куйбышев, 1988. С. 49-54.
7. Бевза В. Ф., Бодяко А. М., Попов В. Б. Тепловые условия формирования отливок из высокохромистого чугуна при литье направленным затвердеванием // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1992. № 2. С. 56-59.
8. Бевза В. Ф., Марукович Е. И., Павленко З. Д., Тутов В. И. Непрерывное литье намораживанием. Мн.: Наука и техника, 1979.
9. Горшков А. А., Волощенко М. В., Дубров В. В., Крамаренко О. Р. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна. М.: Киев: Машгиз, 1961.
10. Чугун: Справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. М.: Металлургия, 1991.