



Физическая модель процесса кристаллизации осевой зоны отливок шаровой, цилиндрической и плоской форм

Разработана физическая модель процесса ускоренного затвердевания центральных зон отливок из различных сплавов, которая основывается на гипотезе об увеличении количества растущих центров кристаллизации при сужении фронта затвердевания в осевой зоне шаровых, цилиндрических и плоских отливок. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: затвердевание, отливки, осевая зона, физическая модель, центры кристаллизации

A physical model of the central zones of rapid solidification of castings of various alloys, which is based on the hypothesis of an increase in the number of growing nuclei at narrowing the solidification front in the axial zone of spherical, cylindrical and flat castings.

Keywords: curing, casting, axial zone, the physical model, nucleating.

Состояние вопроса и постановка проблемы

В теории литейных процессов принято считать шаровую, цилиндрическую и плоскую формы - основными элементами, из комбинации которых состоит отливка. Затвердевание плоских полубесконечных отливок рассчитывают, как правило, по уравнению квадратного корня: $x = k\sqrt{\tau}$, где x – толщина затвердевшего слоя металла; τ – время; k – коэффициент затвердевания. Закон «квадратного корня» это один из видов решения задачи Стефана-Шварца [1-3].

Величина k представляет собой корень сложного трансцендентного уравнения и зависит от множества факторов, характеризующих процесс затвердевания: термофизических коэффициентов материала отливки и литейной формы, температуры перегрева, затвердевания и др. Допущения, принятые при решении задачи Стефана-Шварца, следующие: полубесконечная отливка и полубесконечная форма соприкасаются поверхностью в виде неограниченной плоскости; между отливкой и формой устанавливается идеальный контакт; температуры их соприкосновения не изменяются в процессе затвердевания; теплофизические параметры материала отливки и формы не зависят от температуры, но в жидком и твердом состоянии могут иметь разные величины; теплопередача в твердой и жидкой частях отливки подчиняется уравнению Фурье, конвекция не учитывается; заливка сплава в форму производится без перегрева.

Анализ уравнения квадратного корня указывает на первоначальное ускоренное и последующее замедленное затвердевание отливки по параболической кривой. Это объясняют тем, что в процессе прогрева литейной формы уменьшается количество тепла, которое может аккумулировать материал литейной формы. Таким образом, согласно уравнению квадратного корня скорость затвердевания в центральной (осевой) зоне отливки должна уменьшаться.

Реальные условия процесса кристаллизации отличаются от теоретических расчетов. Экспериментальными исследованиями с помощью термопар установлено ускоренное затвердевание не только поверхностной, но и центральной (осевой) части отливки [4-6]. Причиной этого явления называют возможную ликвацию химических элементов в осевую зону отливки. Предполагают, что происходит «увеличение переохлаждения (скорости охлаждения) последних участков жидкости в сердцевине отливки» [5 стр. 272]. Однако объяснение причины увеличения скорости охлаждения в центре отливки отсутствует.

Установлено ускоренное затвердевание осевой зоны отливок из различных видов сплавов: алюминия, алюминия с 3,84 % Si, 7,55 % Si, и 12,77 % Si, железо армко, сталь с 0,4 % C и 0,93 % C, чугун с 4,84 % C, чугун с 3,45 % C и 4,00 % Si [6]. Объяснить это ликвацией химических элементов невозможно.

Анализ изменения скорости кристаллизации по радиусу отливок показал, что закону «квадратного корня» полностью подчиняется только начальная стадия затвердевания. В осевой части отливки перемещение границы солидус и выливаемости происходит с ускорением не только в шаровой и цилиндрической форме, но и в плоской отливке.

Цель - разработать физическую модель процесса кристаллизации осевой зоны отливок шаровой, цилиндрической и плоской форм.

Изложение основного материала исследований

Результаты экспериментальных замеров температуры охлаждения чугуна с шаровидной формой графита в комбинированной кокильной и песчано-глинистой цилиндрических формах [7] обработали в виде, представленном на рис. 1. По показаниям экспериментальных кривых охлаждения, полученных с помощью термопар, установленных на расстоянии 225, 150, 90, 17 мм, соответственно, от внутренней

поверхности кокиля, рассчитали скорость охлаждения (V , °C/мин) чугуна в интервале температур ликвидус-солидус (1 на рис. 1). При радиусе отливки 225 мм наружный слой толщиной до 45 мм охлаждается со скоростью от 60 до 10 °C/мин, а ее осевой слой такой же толщины от 0,22 до 0,20 °C/мин, т.е. в 300-45 раз медленнее.

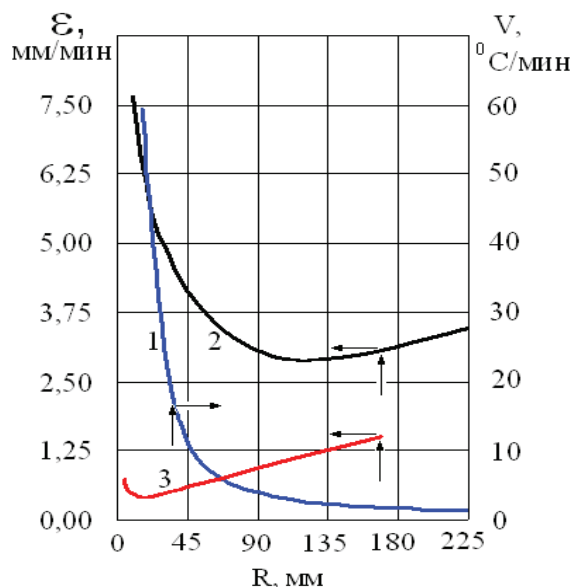


Рис. 1. Скорость охлаждения в интервале температур ликвидус-солидус (V , °C/мин) и скорость продвижения фронта затвердевания солидус (ϵ , мм/мин) в цилиндрической отливке из чугуна с шаровидной формой графита в кокиле Ø450 мм и песчано-глинистой форме Ø330 мм

Несмотря на постоянное уменьшение скорости охлаждения металла от поверхности в глубину отливки радиусом 225 мм, скорость продвижения фронта затвердевания солидус (2 на рис. 1) уменьшается только до глубины ~115 мм, где составляет 2,88 мм/мин. Затем, начиная со 130 мм, скорость продвижения фронта затвердевания возрастает и в осевой зоне достигает 3,46 мм/мин, что в 1,2 раза выше, чем на глубине 115 мм.

При охлаждении этой отливки в песчано-глинистой части формы радиусом 165 мм скорость продвижения фронта затвердевания солидус (3 на рис. 1) уменьшается с 0,74 до 0,41 мм/мин на глубине 17 мм, а затем возрастает в ~2 раза до 1,47 мм/мин в осевой зоне отливки.

Таким образом, в процессе затвердевания происходит нагрев литейной формы и уменьшается количество тепла, которое отводится от отливки. Несмотря на уменьшение скорости охлаждения сплава в интервале температур ликвидус-солидус от поверхности в глубь отливки скорость продвижения фронта затвердевания солидус сначала уменьшается, а затем возрастает в осевой зоне отливки как в кокильной, так и в песчано-глинистых частях формы. Это также подтверждается экспериментальными замерами для отливок, имеющих форму шара, цилиндра и пластины [6].

Затвердевание центральных зон отливок происходит по гетерогенному механизму, т.к. в рассматриваемый момент времени расплав уже содержит твердую

фазу, а, например, границы солидус и выливания соответствуют температурам, которые меньше ликвидус.

Поэтому в рассматриваемой теплофизической модели ускоренное затвердевание центральных зон отливок обусловлено увеличением количества растущих центров кристаллизации на единицу поверхности фронта затвердевания при его сужении в осевой зоне. Так, на рис. 2 приведена макроструктура бочки прокатного валка, охлаждение которого происходило в чугунном кокиле диаметром 450 мм [7]. Четко прослеживается сквозная столбчатость от поверхности к осевой зоне.



Рис. 2. Макроструктура бочки прокатного валка из чугуна с шаровидной формой графита Ø 450 мм (в осевой зоне виден след горячего спая термопары) [7]

Поэтому в предлагаемой схеме при продвижении фронта затвердевания от поверхности теплоотвода к центру (рис. 3) наблюдается увеличение количества центров кристаллизации на единицу поверхности или объема сплава в осевой зоне отливки.

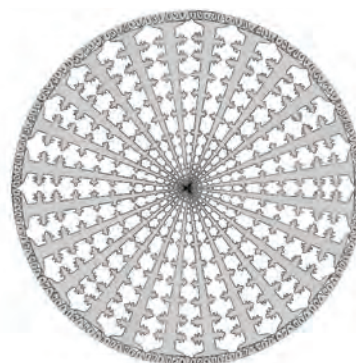


Рис. 3. Схема теплофизической модели затвердевания цилиндрической и шаровой отливок при сужении фронта затвердевания в осевой зоне

Если принять количество центров кристаллизации N , растущих от поверхности отливки к центральной (осевой) зоне, равным единице, то их количество N_R на единицу поверхности шаровой отливки радиусом R составит

$$N_{Rb} = \frac{N}{S_R} \quad (1)$$

где S_R – площадь поверхности шаровой отливки радиусом R .

В процессе затвердевания уменьшается толщина

не затвердевшего слоя металла γ от $\gamma/R = 1$ на поверхности отливки до $\gamma/R = 0$ в центральной (осевой) зоне. Если в первом приближении принять одинаковое количество растущих центров кристаллизации N на поверхности и в глубине отливки, то при радиусе не затвердевшего слоя металла γ их количество N_{rb} на единицу поверхности шаровой отливки составит

$$N_{rb} = \frac{N}{S_r}, \quad (2)$$

где S_r – площадь поверхности не затвердевшего слоя металла радиусом γ в шаровой отливке радиусом R .

Приравняв (1) и (2) по N и выразив площадь S через радиус рассматриваемой зоны отливки, получим количество центров кристаллизации K_{rb} на единицу поверхности шаровой отливки радиусом R

$$N_{rb} 4\pi r^2 = N_{Rb} 4\pi R^2 \quad \text{или}$$

$$N_{rb} = N_{Rb} \frac{R^2}{r^2}. \quad (3)$$

Количество центров кристаллизации K_{rb} на единицу объема шаровой отливки радиусом R составит

$$K_{Rb} = \frac{N}{V_R}, \quad (4)$$

где V_R – объем шаровой отливки радиусом R .

В процессе затвердевания уменьшается толщина не затвердевшего слоя металла с R до γ . Если в первом приближении принять одинаковое количество растущих центров кристаллизации N на поверхности и в глубине отливки, то их количество на единицу объема шаровой отливки K_{rb} составит

$$K_{rb} = \frac{N}{V_r}, \quad (5)$$

где V_r – объем не затвердевшего слоя металла радиусом γ в шаровой отливке радиусом отливки R .

Приравняв (4) и (5) по N и выразив объем через радиус рассматриваемой зоны отливки, получим количество центров кристаллизации K_{rb} на единицу объема шаровой отливки радиусом R

$$K_R \frac{4}{3} \pi R^3 = K_{rb} \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \text{или}$$

$$K_{rb} = K_R \frac{R^3}{r^3}. \quad (6)$$

Аналогичные по схеме расчеты выполнены для цилиндрической полубесконечной отливки. Количество центров кристаллизации N_{rc} на единицу поверхности цилиндрической отливки составит

$$N_{rc} = N_{RC} \frac{R}{r} \quad (7)$$

Количество центров кристаллизации K_{rc} на единицу объема цилиндрической отливки составит

$$K_{rc} = K_{RC} \frac{R^2}{r^2} \quad (8)$$

Для плоской полубесконечной отливки количество центров кристаллизации N_{rp} на единицу поверхности составит

$$N_{rp} = N_{RP} \quad (9)$$

Для плоской полубесконечной отливки количество центров кристаллизации K_{rp} на единицу объема составит

$$K_{rp} = K_{RP} \frac{R}{r} \quad (10)$$

Все выведенные формулы для модели процесса кристаллизации осевой зоны отливок шаровой, цилиндрической и плоской форм сведены в таблице.

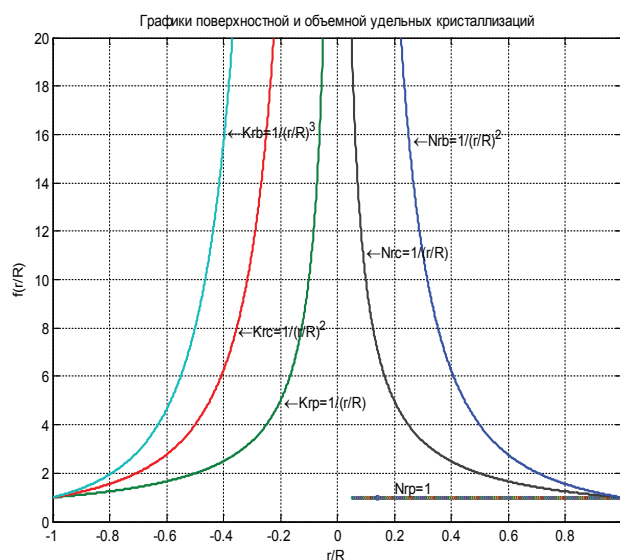


Рис. 4. Влияние положения фронта затвердевания по глубине отливок различной конфигурации на изменение количества центров кристаллизации на единицу поверхности (N_r) и объема (K_r) затвердевающего сплава: R – радиус (половина толщины) отливок; γ – не затвердевшая часть металла; $r/R = 0$ – осевая зона отливок; $r/R = 1$, $r/R = -1$ – наружная поверхность отливок; индексы для конфигурации отливок: p – плоская полубесконечная пластина; c – цилиндр полубесконечный; b – шар; $N_R = 1$, $K_R = 1$ на поверхности отливок

Сравнительный анализ полученных формул (рис. 4) показал, что после затвердевания $0,5R$ шаровой отливки количество центров кристаллизации на единицу поверхности будет в 4 раза больше, чем в слое отливки, прилегающем к литейной форме. Для цилиндрической отливки при $0,5R$ количество центров кристаллизации на единицу поверхности увеличивается в 2 раза, а для плоской отливки – остается неизменным. При затвердевании осевых зон реальных отливок «...ускорение имеет место не только в сферических и цилиндрических отливках, но и в плоских» [6, с. 185].

Таблица. Количество центров кристаллизации на единицу поверхности N_r и объема K_r отливок различной конфигурации при уменьшении толщины не затвердевшего слоя отливки

| Конфигурация отливки | Количество центров кристаллизации при изменении толщины не затвердевшего слоя отливки от R до r | |
|-------------------------|---|-----------------------------------|
| | на единицу поверхности отливки | на единицу объема отливки |
| Плоская полубесконечная | $N_{rp} = N_{RP}$ | $K_{rp} = K_{RP} \frac{R}{r}$ |
| Цилиндр полубесконечный | $N_{rc} = N_{RC} \frac{R}{r}$ | $K_{rc} = K_{RC} \frac{R^2}{r^2}$ |
| Шар | $N_{rb} = N_{Rb} \frac{R^2}{r^2}$ | $K_{rb} = K_{Rb} \frac{R^3}{r^3}$ |

Этому условию отвечают только формулы, полученные для расчета количества центров кристаллизации на единицу объема не затвердевшей части отливки. Для плоской отливки при $0,5R$ количество центров кристаллизации увеличивается в 2 раза, при затвердевании цилиндрической отливки – в 4 раза, а при затвердевании шаровой – в 8 раз. Максимальная скорость затвердевания фиксируется в осевой зоне по выполненным расчетам и в экспериментальных замерах с помощью термопар.

Выводы

1. Экспериментальные исследования процесса затвердевания отливок из различных сплавов выявили ускоренное затвердевание осевой зоны отливок шаровой, цилиндрической и плоской форм. Это происходит несмотря на непрерывное уменьшение теплоотвода в литейную форму и уменьшение скорости охлаждения сплава в интервале температур ликвидус-солидус. Причины этого процесса не выявлены.
2. Разработана физическая модель процесса ускоренного затвердевания центральных зон отливок

из различных сплавов, которая основывается на гипотезе об увеличении количества растущих центров кристаллизации при сужении фронта затвердевания в осевой зоне шаровых, цилиндрических и плоских отливок.

3. Расчетные формулы позволили установить, что условию ускоренного затвердевания центральных зон отливок отвечают только формулы, полученные для расчета количества центров кристаллизации на единицу объема не затвердевшей части отливки.

Библиографический список

1. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Т. 1. - М.: Машиностроение, 1976. - 328 с.
2. Раддл Р.У. Затвердевание отливок / Пер. с англ. - М.: Машгиз, 1960. - 392 с.
3. Хворинов Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали / Пер. с чеш. - М.: Машгиз, 1958. - 392 с.
4. Вейник А.И. Тепловые основы литья. - М.: Машгиз, 1953. - 383 с.
5. Бунин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н. Основы металлографии чугуна. - М.: Металлургия, 1969. - 415 с.
6. Гуляев Б.Б. Литейные процессы. - М.-Л.: Машгиз, 1960. - 416 с.
7. Лейбензон В.А., Пилюшенко В.Л., Кондратенко В.М. и др. Затвердевание металлов и металлических композиций / Уч. для вузов. - К.: Наукова думка, 2009. - 410 с.

Поступила 04.04.2013



Вниманию подписчиков, авторов, рекламодателей !

*Журнал публикует материалы, связанные с памяtnыми датами предприятий и юбилеями известных ученых-металлургов, руководителей предприятий.
Просим заблаговременно представлять материалы в редакцию.*

**к.т. 0562-46-12-95
факс 0562-46-12-95**