



The reasons of arising of the hollow castings polythickness at free forming of internal surface are investigated. The recommendations on its reduction are given.

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

УДК 621.746.6:621.74.047

ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ОТЛИВОК ПРИ СВОБОДНОМ ФОРМИРОВАНИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Характер и кинетика затвердевания отливок в значительной мере определяют их качество, производительность процесса и требования к системе теплоотвода от затвердевающего металла. При литье полых заготовок типа втулок методом направленного затвердевания при свободном формировании внутренней поверхности формой (кристаллизатором) ограничивается только наружная поверхность отливки, а внутренняя получается непосредственно из расплава, т.е. не имеет жесткого ограничения и определяется только фронтом затвердевания [1, 2]. Как и при непрерывной разливке металлов, это обстоятельство обеспечивает практически свободную усадку затвердевающей отливки, так как этому процессу ничто не препятствует кроме ферростатического давления жидкого металла, постоянно находящегося в центральной части кристаллизатора. При этом надо отметить, что если при НРС образование твердой корки металла в кристаллизаторе является начальной стадией затвердевания и ее разнотолщинность может быть устранена в зоне вторичного охлаждения, то при литье полых заготовок направленным затвердеванием, извлеченная из кристаллизатора оболочка представляет собой окончательное тело сформированной отливки и исправление разнотолщинности стенки, если она имеет место, уже невозможно. В связи с этим первостепенное значение приобретает обеспечение равномерного продвижения фронта затвердевания по периметру в течение всего времени формирования отливки в кристаллизаторе.

Практически все исследователи, занимающиеся изучением процесса формирования слитка при НРС, указывают на неравномерный по периметру рост корки в процессе ее затвердевания в кристаллизаторе. При этом установлено, что наибольшей чувствительностью к условиям образования неравномерной по толщине стенки обладает слиток круглого сечения [3, 4].

Для устранения либо минимизации этого явления разрабатывают и применяют различные методы. К ним относятся, например, требования обеспечения равномерного теплоотвода от охлаждаемой поверхности кристаллизатора, допустимое снижение температуры разливаемого металла, перемешивание расплава в процессе затвердевания, профилирование рабочей поверхности кристаллизатора и др. Однако для каждого способа литья приходится решать свою конкретную задачу по обеспечению благоприятного режима затвердевания металла. Решение этой задачи для случая, когда внутренняя поверхность получается непосредственно из расплава, имеет свои специфические особенности, определяемые условиями теплоотвода от поверхности отливки, характером взаимодействия затвердевающей корки с расплавом и рабочей поверхностью кристаллизатора, способом подачи металла в зону формирования отливки, режимом извлечения затвердевшей оболочки из кристаллизатора и расплава и т.п.

Цель настоящей работы – анализ и выявление причин возникновения разнотолщинности полых отливок, затвердевающих в условиях свободного формирования внутренней поверхности, и разработка рекомендаций по ее минимизации.

Аналитическое исследование затвердевания проводили для схемы одномерной радиальной теплопередачи при условии одинаковой по периметру интенсивности теплоотвода, т.е. затвердевание рассматривали как плавный процесс, характеризуемый функцией $\xi(\tau)$.

При решении задачи были приняты следующие допущения: тепловой поток на поверхности отливки $q_1(\tau)$ равен тепловому потоку на рабочей поверхности кристаллизатора $q_2(\tau)$, затвердевание металла происходит при постоянной температуре, равной температуре солидуса ($T_{\text{сол}}$), распределение температуры по толщине затвердевающей корки линейно. Расчет проводили поэтапно, принимая для каждого этапа достаточно малый промежуток

времени, в течение которого принимали средние значения теплофизических характеристик. Система уравнений для расчета затвердевания отливки имеет вид [5]

$$\xi_i = R - \sqrt{(R - \xi_{i-1})^2 - \frac{2q_{li}(\tau)\Delta\tau_i R}{\rho_i L_{\text{эф},i}}}, \quad (1)$$

$$T_{li} = T_{\text{сол}} - \frac{q_{li}(\tau)\xi_{\text{ср}i}}{\lambda_1}, \quad (2)$$

$$L_{\text{эф},i} = L_1 + C_1^i(T_{\text{зал}}(\tau) - T_{\text{сол}}) + C_1 A_{\text{ср}}(T_{\text{сол}} - T_{li}), \quad (3)$$

где

$$q_1(\tau) = q_2(\tau) = \frac{\lambda_2(\theta_1(\tau) - \theta_2(\tau))}{X_2 \left[1 - \frac{X_2}{2R_1}\right]} + \frac{X_2 \lambda_2}{2a_2 \left[1 - \frac{X_2}{2R_1}\right]} \frac{d\theta_1(\tau)}{d\tau},$$

где $X_2 = R_2 - R_1$ — толщина стенки кристаллизатора; $\theta_1(\tau)$ и $\theta_2(\tau)$ — измеренные температуры вблизи рабочей и водоохлаждаемой поверхности стенки кристаллизатора; λ_2 и a_2 — коэффициенты теплопроводности и температуропроводности ма-

териала кристаллизатора; $A_{\text{ср}} = 1/4 \left[1 + \frac{1 - \delta_k/3}{1 - \delta_k/2}\right]$,

$\delta_k = \frac{\xi_k}{R}$, R , ξ_k — наружный радиус и толщина стенки отливки; ρ_1 , λ_1 — плотность и коэффициент теплопроводности материала отливки; $T_{\text{зал}}$, T_1 — температура заливки и наружной поверхности отливки; $\xi_{\text{ср}i} = \xi_{i-1} + (\xi_i - \xi_{i-1})/2$ — среднее значение толщины затвердевшей корки к моменту времени $\tau_{i-1} + \Delta\tau_i/2$; $\Delta\tau_i$ — промежуток времени, для которого ведется расчет; L_1 , $L_{\text{эф}}$ — истинная и эффективная теплота кристаллизации; C_1^i , C_1 — удельная теплоемкость жидкого и твердого металла.

В общем случае затвердевание отливки происходит в интервале температур кристаллизации $\Delta T_{\text{кр}}$. В связи с этим перед фронтом затвердевания имеет место переходная (двухфазная) зона. Часть этой зоны, примыкающей к фронту затвердевания, уносится вместе с отливкой при ее извлечении из кристаллизатора. Корректировку расчета с учетом эффекта выноса жидкой фазы можно выполнить по выражению:

$$\xi_{ki} = \xi_i + b\xi_i \left[\frac{T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}}}{T_{\text{сол}} - T_1} \right], \quad (4)$$

где b — коэффициент, учитывающий эффект выноса жидкой фазы.

Расчеты показывают, что при литье заготовок из серого чугуна в начальный момент затвердевания в результате непосредственного контакта рабочей поверхности кристаллизатора с жидким металлом скорость изменения температуры на поверхности отливок составляет около 400 К/с.

Затвердевание чугуна в этот момент происходит со скоростью, превышающей 3 мм/с. С увеличением толщины корочки эта скорость заметно снижается и, например при толщине 12 мм, не превышает 0,5 мм/с. При этом скорость изменения температуры на наружной поверхности отливки имеет значение 10 К/с. Теоретически и экспериментально было установлено, что в этих условиях средняя скорость затвердевания металла при получении заготовок с толщиной стенки 15 мм из серого чугуна со степенью эвтектичности 0,80–0,82 составляет около 0,8 мм/с. Эти результаты получены при условии равномерного радиального роста корки по периметру отливки.

Как показывает практика, в реальных условиях имеют место флуктуации-колебания функции $\xi(\tau)$. Поэтому для более полного анализа условий затвердевания отливки целесообразно рассматривать функцию $\xi(\tau)$ как результат двух процессов: определенного и случайного, стохастического, при котором возникают $\Delta\xi$.

Известно [3, 6], что одной из основных причин разнотолщинности отливок в поперечном сечении при свободном формировании внутренней поверхности является неравномерный по периметру теплоотвод от затвердевающей корки. Этому явлению может способствовать неравномерность охлаждения наружной поверхности рабочей втулки кристаллизатора, обусловленная неодинаковым режимом течения воды в различных зонах ее взаимодействия с охлаждаемой поверхностью. В связи с этим на первом этапе была разработана и создана новая конструкция кристаллизатора, обеспечивающая равномерность охлаждения рабочей втулки по периметру и высоте [7]. Это было достигнуто за счет тангенциальной подачи охлаждающей воды в рубашку кристаллизатора и рассредоточения концентрированной струи воды при помощи рассеивающей сетки специальной конструкции.

Однако равномерность охлаждения наружной поверхности рабочей втулки кристаллизатора полностью не устраняет возможности образования разнотолщинности отливок. В затвердевающей оболочке по случайным причинам могут развиваться разные по величине силы усадки, которые приводят к образованию неравномерного по периметру газового зазора, что и обуславливает утонение стенки по нескольким участкам периметра (рис. 1). При этом разность ($\Delta\xi$) между максимальной (ξ_{max}) и минимальной (ξ_{min}) толщиной стенки может достигать до 8 мм, а коэффициент неравномерности толщины может иметь значение менее 0,75 (рис. 1). Здесь $n = \xi_{\text{min}} / \xi_{\text{ср}}$, где $\xi_{\text{ср}}$ — средняя по периметру толщина стенки в данном сечении. В этом случае средняя скорость затвердевания металла в местах с пониженной интенсивностью теплоотвода от поверхности отливки (в местах утоне-

ния) имеет значение 0,45–0,55 мм/с, что составляет 0,55–0,70 от средней скорости затвердевания в зоне с нормальным теплоотводом.

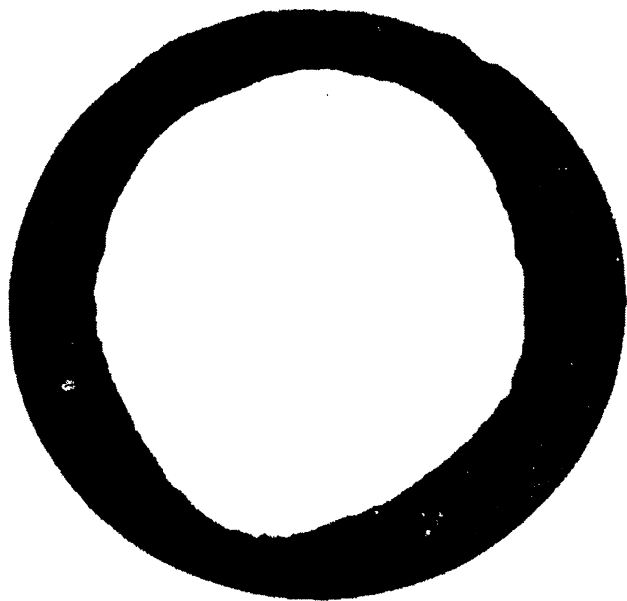


Рис. 1. Поперечное сечение отливки диаметром 100 мм (гладкостенный кристаллизатор; $\Delta\xi=8$ мм; $\xi_{\min}=9$ мм; $\xi_{\text{ср}}=12,5$ мм; $n=0,72$)

При литье заготовок методом направленного затвердевания появление случайных дополнительных сопротивлений между затвердевающей коркой и рабочей поверхностью кристаллизатора наибольшую вероятность имеет в верхней части в период подачи расплава после извлечения предыдущей отливки. Дело в том, что при удалении отливки жидкий металл, постоянно находящийся в осевой зоне, под действием силы тяжести автоматически и практически мгновенно занимает объем, освобождающийся под нижним торцом движущейся вверх отливки, и начинается затвердевание следующей заготовки. При этом мениск жидкого металла в кристаллизаторе опускается вниз. В связи с этим верхняя зона кристаллизатора на какой-то промежуток времени освобождается от контакта как с твердой коркой, так и с жидким металлом. В этот момент начинается подача новой порции расплава. В период заливки возможен локальный заворот оксидной либо шлаковой пленки с мениска металла на стенку кристаллизатора, что приводит к увеличению термического сопротивления на этом участке и появлению разнотолщинности отливки в поперечном сечении. Надо отметить, что появлению разнотолщинности отливки по периметру верхней части способствует также уменьшение металлостатического напора на этом участке по сравнению с нижележащими зонами. В результате появляется большая вероятность неплотного контакта локальных участков поверхности затвердевающей оболочки и кристаллизатора. При этом возникающая под действием случайных факторов первоначаль-

ная неравномерность толщины затвердевающей оболочки в дальнейшем усиливается (а не сглаживается) благодаря росту неравномерности охлаждения отливки по периметру из-за ее несимметричной деформации, которая концентрируется на наиболее тонком и нагретом участке.

Случайность возникновения локального дополнительного термического сопротивления подтверждается анализом партии заготовок, полученных в процессе одной кампании разлива. Было установлено, что в процессе одной разлива могут получаться заготовки без разностена ($n=1,0$) и с разностеном до 2,5 мм при $n=0,9$. Эти результаты получены в одном сечении по высоте отливок (в верхней части). Устранению этого явления может способствовать разработка способа, исключающего падение уровня металла ниже верхнего торца стационарного кристаллизатора после извлечения предыдущей отливки, создание нейтральной либо восстановительной атмосферы над мениском металла в кристаллизаторе и очистка его от шлака.

Таким образом, при формировании отливки в кристаллизаторе необходимо обеспечивать равномерность кристаллизации металла по периметру в течение всего времени затвердевания. Это существенно повышает прочность затвердевающей корки, уменьшает вероятность ее коробления и образования трещин, обеспечивает получение заготовок с равномерной толщиной стенки в поперечном сечении.

Одним из эффективных технических решений, способствующих устранению либо минимизации разнотолщинности отливок в поперечном сечении, является рассредоточение деформации на возможно большей части периметра, т.е. создание определенного количества участков, способных принять на себя неизбежную величину деформации. Достигается это путем профилирования рабочей поверхности кристаллизатора [3, 5, 6 и др.].

При литье полых мерных заготовок методом направленного затвердевания профилирование кристаллизатора заключалось в выполнении продольных пазов по образующим ее рабочей поверхности с шагом 5–10 мм. Установлено, что профиль пазов незначительно влияет на условия формирования отливки.

Профилирование кристаллизатора позволяет равномерно рассредоточить деформацию затвердевающей корки по периметру и соответственно обеспечить равномерный теплоотвод от ее наружной поверхности, что способствует стабильному получению качественных отливок без заметной разностенности (рис. 2).

Однако профилирование рабочей поверхности кристаллизатора наряду с положительным эффектом имеет и отрицательные стороны. Заготовки из чугуна, получаемые исследуемым спосо-

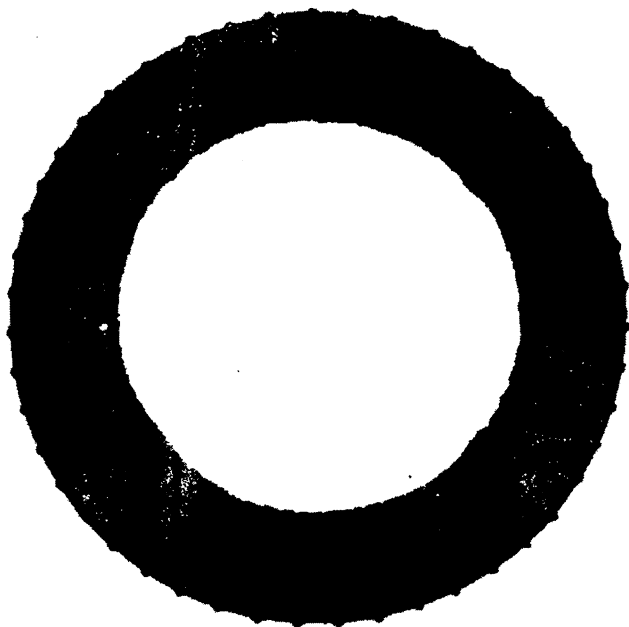


Рис. 2. Поперечное сечение отливки диаметром 93 мм (профилированный кристаллизатор; $\Delta\xi=0,8$ мм; $\xi_{\min}=16,5$ мм; $\xi_{\text{ср}}=16,75$ мм; $n=0,985$)

бом, как правило, используются для изготовления деталей машин и соответственно подвергаются механической обработке. При этом наличие приливов на наружной поверхности отливок создает ударные нагрузки на резец, что снижает его стойкость и ухудшает условия обработки. Кроме того, выполнение пазов на рабочей поверхности кристаллизатора заметно повышает трудоемкость изготовления технологической оснастки.

В связи с изложенным выше были предприняты попытки получения заготовок с минимальной разнотолщинностью в поперечном сечении на гладкостенном кристаллизаторе без профилирования. Известно [3], что снижению разнотолщинности отливок способствует уменьшение интенсивности теплоотвода от поверхности затвердевающей корки к охлаждающей воде. При этом уменьшается относительное влияние на теплопередачу случайных термических сопротивлений в виде неравномерного газового зазора, оксидов, частиц шлака и т.п. Реализация этого пути снижения разнотолщинности отливок осуществлялась за счет применения стальных рабочих втулок кристаллизатора с максимально допустимой толщиной стенки, которая определялась по формулам работы [8]. Кроме того, внутреннюю поверхность рабочей втулки выполняли с шероховатостью $R_z > 70$ мкм. Перед каждой кампанией разливки кристаллизатор смазывали графитовой коллоидной смазкой. В процессе разливки при контакте смазки с жидким металлом и затвердевающей коркой на рабочей поверхности образуются сажистые отложения, располагающиеся во впадинах между гребешками. В связи с тем что сажа имеет низкий коэффициент теплопроводнос-

ти ($\lambda=0,07-0,12$ Вт/(м·К)) [9, 10], ее наличие на рабочей поверхности кристаллизатора способствует снижению интенсивности теплоотвода от поверхности отливки.

Применение указанных мероприятий позволило получать полые заготовки с допустимой разнотолщинностью в поперечном сечении при литье в гладкостенный кристаллизатор (рис. 3).

Проведенный анализ и опыт производства показал, что при литье низколегированного чугуна доэвтектического состава в непрофилированный кристаллизатор диаметром 50–220 мм для получения заготовок толщиной стенки 10–20 мм более 93% изделий имеют разностен в поперечном сечении $\Delta\xi < 1,6$ мм при коэффициенте неравномерности толщины стенки $n \geq 0,95$. При этом разность диаметров у более 94% заготовок не превышает 1,1 мм.

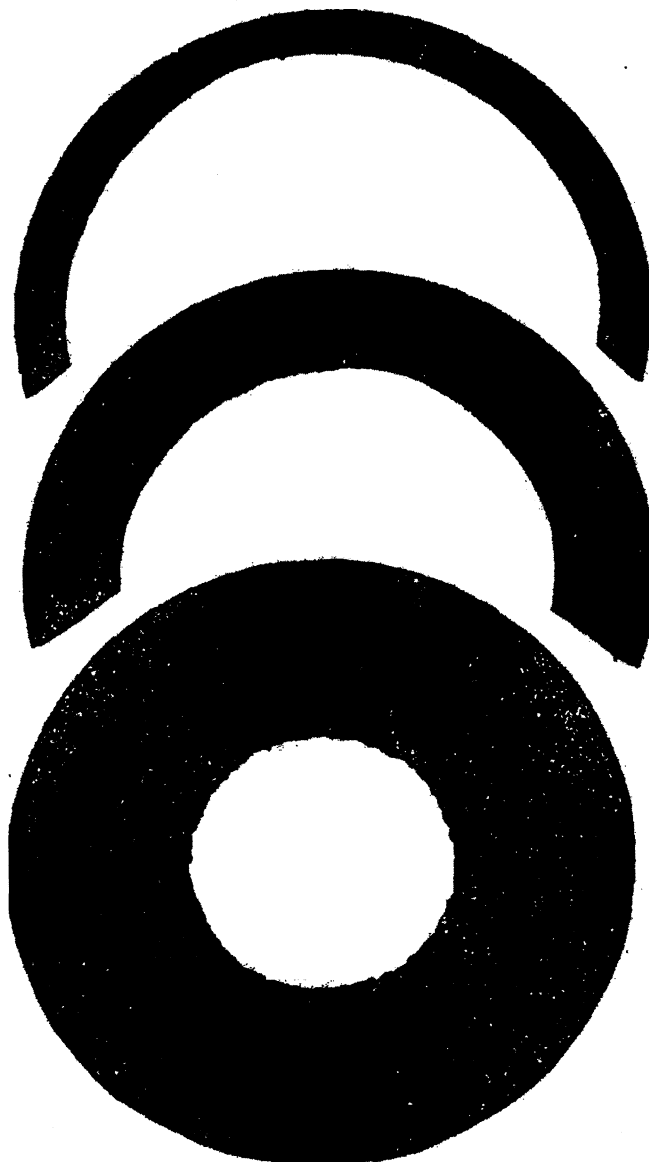


Рис. 3. Поперечное сечение отливок различной толщины (гладкостенный кристаллизатор)

Таким образом, установлено, что для устранения либо минимизации разнотолщинности отливок в поперечном сечении при свободном формировании внутренней поверхности необходимо обеспечить снижение интенсивности теплоотвода от затвердевающей оболочки и его равномерность по периметру в течение всего времени затвердевания. Это достигается профилированием рабочей поверхности кристаллизатора, выбором оптимальной толщины его стенки и применением смазки, имеющей минимальный коэффициент теплопроводности.

Литература

1. Ефимов В.А., Анисович Г.А., Бабич В.Н. и др. Специальные способы литья: Справ. М.: Машиностроение, 1991.
2. Бевза В.Ф., Бодяко А.М., Мазько В.С., Попов В.Б. Литье намораживанием втулок и заготовок поршневых колец // Литейное производство. 1998. №5. С. 25–27.

3. Журавлев В.А., Китаев В.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка. М.: Metallurgia, 1974.
4. Китаев В.М., Трухин М.К. Неравномерность фронта затвердевания непрерывного слитка круглого сечения // Тр. Горьков. политехн. ин-та им. А.А.Жданова. Горький, 1970. Т. XXVI. Вып. 12. С. 25–27.
5. Бевза В.Ф., Марукович Е.И., Павленко З.Д., Тутов В.И. Непрерывное литье намораживанием. Мн.: Наука и техника, 1979.
6. Рутес В.С., Аскольдов В.И., Евтеев Д.П. и др. Теория непрерывной разливки. Технологические основы. М.: Metallurgia, 1971.
7. Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Стеценко В.Ю. Исследование гидропотоков в охлаждающей рубашке кристаллизатора для непрерывно-циклического литья намораживанием // Литье и металлургия. 2003. №2. С. 31–33.
8. Бевза В.Ф., Марукович Е.И., Попковский В.А. Расчет напряжений и упругопластических деформаций в стальном кристаллизаторе при циклическом тепловом нагружении // Литье и металлургия. 2004. №2. С. 43–48.
9. Казанцев Е.И. Промышленные печи. М.: Metallurgia, 1975.
10. Беляев Н.М. Основы теплопередачи. Киев: Вища шк., 1989.

Международные мероприятия по металлургии и машиностроению в 2005 г.

| Октябрь | |
|---|--|
| 3–7. Брно, Чехия | 47-я выставка-ярмарка “Оборудование и технология литейного производства” Fond-ex-2005 |
| 4–6. Саратов exhibition@expo.sofit.ru | IV специализированная выставка “Техноэкспо. 2005” |
| 17–20. Торонто, Канада www.atlastravel.ru | CMTS. Выставка высоких технологий (разливочные машины, печи, роботы, CAD/CAM, промышленное оборудование) |
| 20–22. Лондон, Великобритания www.mmc.dircon.co.uk | Foundry International |
| 25–28. Ижевск expo-neft@udm.net | IV специализированная выставка “Машиностроение. Металлургия. металлообработка-2005” |
| Ноябрь | |
| 15–18. Москва www.metal-expo.ru | XI Выставка “Металл-Экспо 2005” |
| 29. Киев, Украина | Выставка “Производство и защита окружающей среды” |
| Мехико, Мексика rusexpo@tele.net.ru | METALFORM MEXICO . Выставка по формовочному оборудованию, металлургии |
| США www.atlastravel.ru | FABTECH . Выставка по металлургии и машиностроению. |
| Декабрь | |
| Шанхай, Китай rusexpo@tele.net.ru | SHANGHAI METAL EXPO . Литье. Литейное оборудование. Металлургические печи. |