

---

# ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 621.771.07

**Е. В. Меньяло**

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСКОРЕННОГО ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗОН ОТЛИВОК

*Затвердевание осевой зоны отливок шаровой, цилиндрической и плоской форм из алюминия, его сплавов с кремнием, железа и его сплавов с углеродом происходит со скоростью, соизмеримой со скоростью затвердевания металла у поверхности формы. Ликвация химических элементов не может быть причиной этого процесса. Предложена 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.*

**Ключевые слова:** прокатный валок, чугун, шаровидный графит, затвердевание, плотность, твердость, цементит, усадочная пористость.

*Твердіння осьової зони виливків кульової, циліндрової та плоскої форм з алюмінію, його сплавів з кремнієм, заліза і його сплавів з вуглецем відбувається із швидкістю, яка сумірна швидкості твердіння металу у поверхні форми. Ліквіація хімічних елементів не може бути причиною цього процесу. Запропонована фізична модель процесу прискореного твердіння центральних зон виливків з різних сплавів, яка ґрунтується на гіпотезі про збільшення кількості центрів кристалізації, що зростають, при звуженні фронту твердіння в осьовій зоні кульових, циліндрових та плоских виливків.*

**Ключові слова:** прокатний валок, чавун, кулястий графіт, твердіння, щільність, твердість, цементит, усадкова пористість.

*The solidification velocity of the core zone of aluminium globular, cylindrical and flat ingots, aluminium alloys with silicon, iron and its alloys with hydrogen is commensurable with the solidification velocity of metal at the mold surface. Aliquation of chemical elements can not be the reason of this process. A physical model of rapid solidification process of different alloys-made ingots' core zone is proposed. The model is based on hypothesis about increase amount of growing crystal grains while the solidification front narrowing in the core zone of globular, cylindrical and flat ingots.*

**Keywords:** forming roll, cast iron, spheroidal graphite, solidification, density, hardness, cementite, shrinkage porosity.

**Состояние вопроса и постановка проблемы.** При производстве прокатных валков для листовых станов не допускается наличие карбидной сетки в шейках и тrefах. Наличие карбидов в осевой зоне уменьшает прочность прокатных валков. Однако известно образование внутреннего (или обратного) отбела в чугунных отливках.

Согласно работе [1], внутренне отбеленной называется отливка, поверхностный слой которой имеет структуру серого чугуна, а середина – структуру белого или половинчатого чугуна. Явление это известно давно, но общепринятого объяснения его до сих пор нет.

Проведенный анализ показал [1], что внутренний отбел можно получить в чугунах различного химического состава. Поэтому причиной его образования, по-видимому, «является увеличение переохлаждения (скорости охлаждения) последних участков жидкости в сердцевине отливки» [1]. Отсутствует объяснение причины увеличения скорости охлаждения в центре отливки.

Затвердевание отливок рассчитывают, как правило, по уравнению квадратного корня:  $x = k\sqrt{\tau}$ , где  $x$  – толщина затвердевшего слоя металла;  $\tau$  – время;  $k$  – коэффициент затвердевания. 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. Анализ этой формулы указывает на первоначальное ускоренное и последующее замедленное затвердевание отливки по параболической кривой. В реальных условиях также происходит ускоренное затвердевание части отливки, которая соприкасается с литейной формой, а по мере продвижения фронта затвердевания в глубь отливки скорость затвердевания уменьшается [2-4]. Это обусловлено тем, что в процессе прогрева литейной формы уменьшается количество тепла, которое может аккумулировать литейная форма. Таким образом, согласно уравнению квадратного корня, скорость затвердевания в осевой зоне отливки должна уменьшаться.

Однако, несмотря на постоянное уменьшение теплоотода из отливки в форму, в центральной (осевой) зоне плоской, цилиндрической и шаровой отливок фиксируется ускорение продвижения фронта затвердевания. Так, на рис. 1, приведены результаты экспериментальных замеров [4] кинетики затвердевания алюминия и сплава алюминия с 7,5 % Si в кокиле радиусом 100 мм.

Закону квадратного корня полностью подчиняется только затвердевание плиты из чистого алюминия (1 на рис. 1, III). При затвердевании цилиндра и шара из алюминия в металлической форме наблюдается ускорение затвердевания в осевой зоне. Соотношение продолжительностей затвердевания плиты, цилиндра и шара при равных радиусах (толщинах) для алюминиевых отливок составляет 1:0,26:0,19 [4]. Это довольно ощутимо расходится с соотношением, вытекающим из гипотезы приведенных толщин – 1:0,25:0,11 [3].

При затвердевании отливок из сплава алюминия с 7,5% Si область затвердевания имеет три границы: начало выделения первичных кристаллов, конец выделения первичных кристаллов и эвтектическое превращение - солидус. Перемещение всех этих трех границ в отливках приближается к параболическому закону в самой начальной стадии затвердевания и резко ускоряется в осевых частях. Причем, ускорение наблюдается не только в сферических и цилиндрических отливках, но и в плоских [4]. Соотношение продолжительности затвердевания плиты, цилиндра и шара для границы ликвидуса составляет 1:0,78:0,65, для границы солидуса – 1:0,36:0,14. Следовательно, для этих сплавов применение расчета по приведенным толщинам неприемлемо.

Одним из факторов ускоренного затвердевания центральной (осевой) зоны отливок, возможно, является ликвация химических элементов в эту зону. Однако если легкоплавкие элементы вытесняются фронтом затвердевания в центральную часть отливки, то температура солидуса должна уменьшиться, а продолжительность затвердевания увеличиться. Но это не соответствует результатам экспериментов.

*Цель работы* – провести анализ и установить причины ускоренного затвердевания центральной (осевой) зоны отливок.

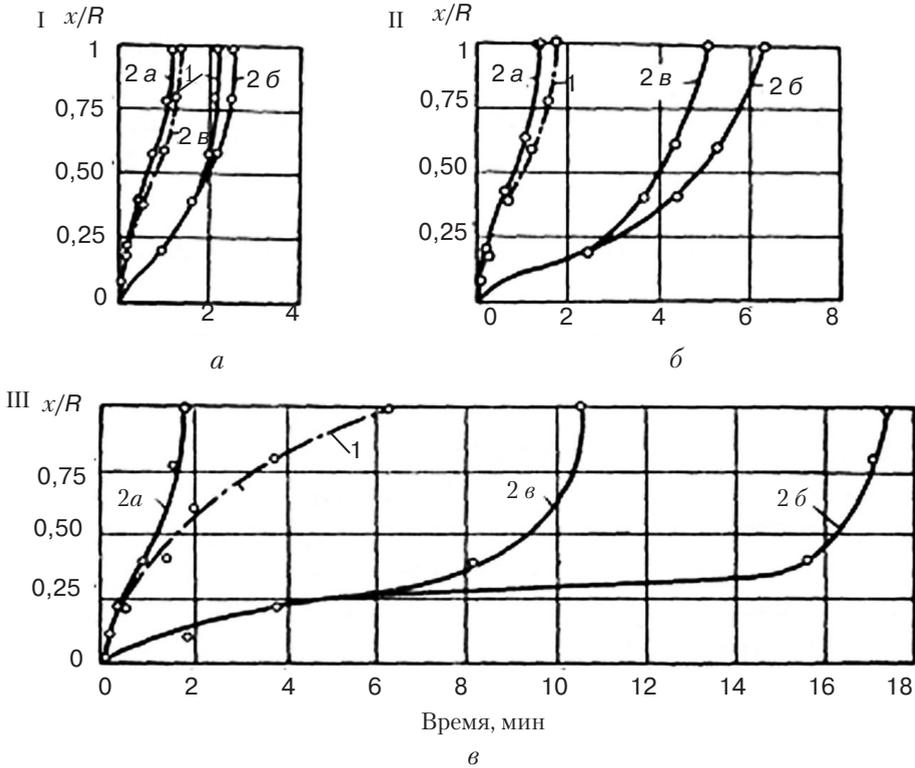


Рис. 1. Кинетика затвердевания алюминия и сплава алюминия с 7,5 % Si в кокиле радиусом 100 мм шара (I), цилиндра (II) и стенки (III): 1 – алюминий; 2 – сплав алюминия с 7,5 % Si; а – ликвидус, б – солидус, в – конец выделения первичных кристаллов

*Изложение основного материала исследований.*

Ускоренное затвердевание осевой зоны, например, отливок из чугуна приводит

к повышению количества цемента и твердости, что неприемлемо для прокатных валков [5]. Так, при охлаждении в кокиле диаметром 431 мм на макроструктуре бочки прокатного валка из отбеленного чугуна видно появление отбела также и в осевой зоне (рис. 2).

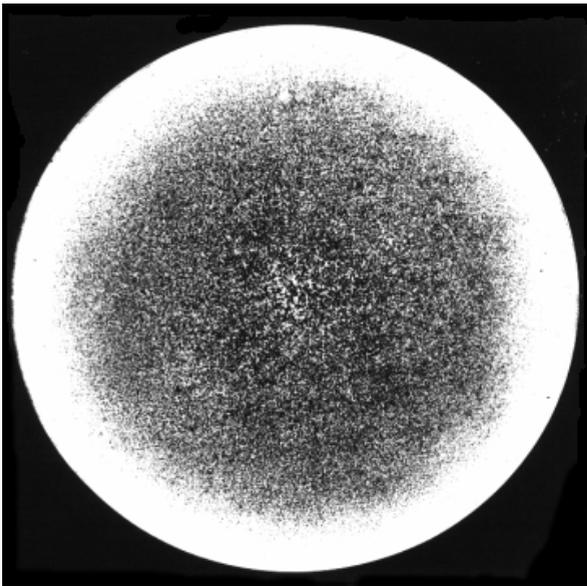


Рис. 2. Макроструктура бочки прокатного валка из отбеленного чугуна при охлаждении в чугунном кокиле  $\varnothing$  431 мм, %мас.: С – 3,75; Si – 0,44; Mn – 0,39; P – 0,38; S – 0,14; Cr – 0,73; Ni – 1,81;  $T_{\text{зал}} \sim 1305^\circ\text{C}$

Объяснить внутренний отбел ликвацией карбидообразующих химических элементов (Mn, Cr, Mo, V и другие) невозможно, так как в работе [7] показано, что при затвердевании чугунных прокатных валков в кокильной части формы ликвация практически отсутствует. Это обусловлено тем, что скорость продвижения фронта затвердевания выше скорости ликвации химических элементов.

Изменение вида сплава не влияет на общий характер затвер-

## Затвердевание сплавов

девания. Отливки из стали толщиной 25, 50 и 100 мм заливали в песчаные формы, температуру затвердевания замеряли термометрами, а при выливании незатвердевшего расплава устанавливали границу перехода сплава из жидкотвердого состояния в твердожидкое (рис. 3). Положение границы питания определяли приблизительно: на основе осмотра разрезов отливок или по рентгенограммам [4].

Из представленных кривых видно, что закону квадратного корня полностью подчиняется только перемещение границы ликвидуса в отливке, имеющей конфигурацию плиты (1 на рис. 3, III). Во всех остальных случаях перемещение границ затвердевания происходит с ускорением в осевой части, в том числе и для плоской отливки – границы солидуса, выливаемости и питания (2, 3, 4 на рис. 3, III), только в начальной стадии фронт затвердевания перемещается по закону, близкому к параболическому. Соотношение продолжительности затвердевания плиты, цилиндра и шара следующее [4]: для границы ликвидуса – 1:0,37:0,28; для границ выливаемости и питания – 1:0,28:0,18; для границы солидуса – 1:0,26:0,15; при расчете по гипотезе приведенных толщин – 1:0,25:0,11.

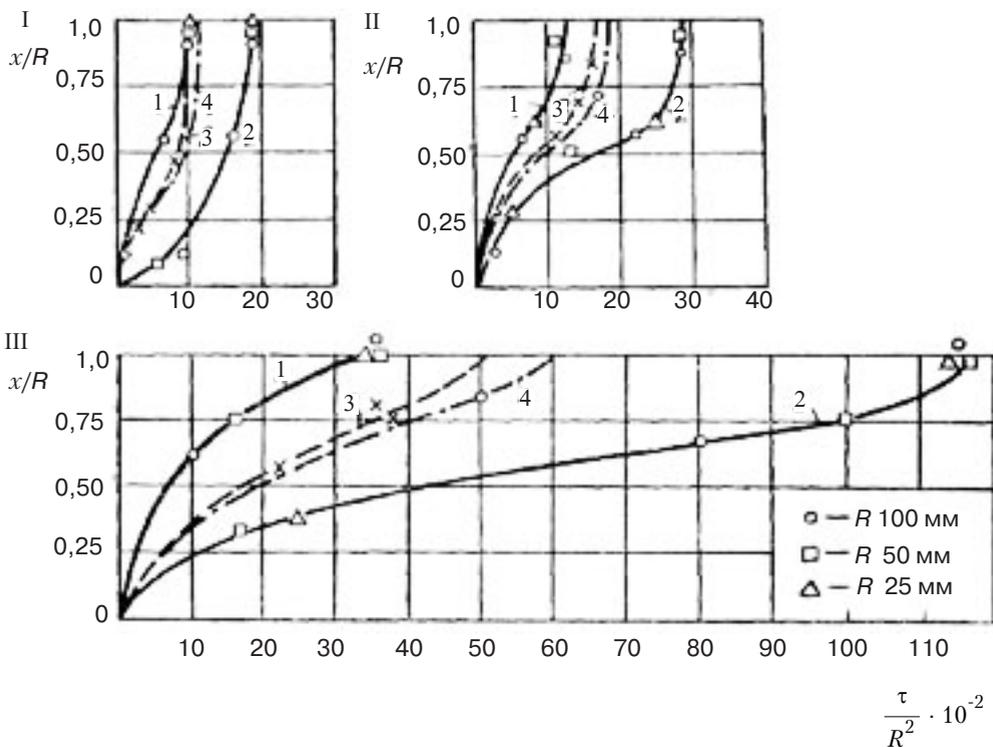


Рис. 3. Кинетика затвердевания шара (I), цилиндра (II) и плиты (III) из стали 35Л в песчаных формах [4]: 1 – ликвидус; 2 – солидус; 3 – граница выливаемости; 4 – граница питания

Изменение средней скорости кристаллизации по радиусу цилиндрических отливок (рис. 4), полученное после обработки экспериментальных данных, также показывает увеличение скорости затвердевания осевой зоны отливок [4].

При затвердевании алюминия и его сплавов (рис. 4, а) скорость затвердевания у поверхности отливки высокая (3,0-1,5 см/мин), но по мере прогрева литейной формы уменьшается. В осевой зоне отливки скорость затвердевания увеличивается так, что в отдельных случаях становится выше, чем у поверхности литейной формы.

Аналогичные результаты получены при исследовании изменения средней скорости кристаллизации по радиусу цилиндрических отливок из железа, стали и чугуна

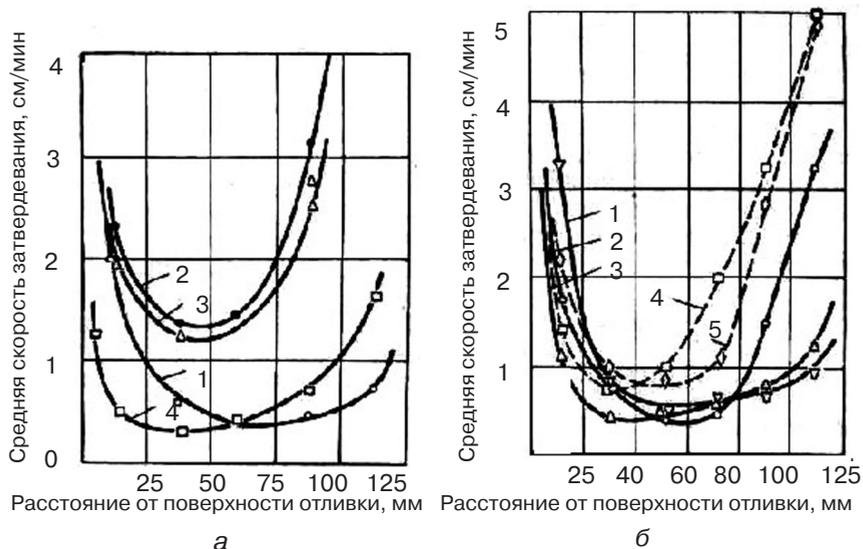


Рис. 4. Изменение средней скорости кристаллизации по радиусу цилиндрических отливок [4]: а – алюминиевые сплавы, % (1 – Al000, 2 – 3,84 Si, 3 – 7,55 Si, 4 – 12,77 Si); б – железоуглеродистые сплавы, % (1 – железо армо, 2 – сталь 0,4 C, 3 – сталь 0,93 C, 4 – чугуи 4,84 C, 5 – чугуи 3,45 C и 4,00 Si)

(рис. 4, б). Изучение размеров зерен в отливках показало, что в сплавах, кристаллизующихся при постоянной температуре (чистые металлы, эвтектические сплавы) или в узком температурном интервале, размер зерна однозначно определяется средней скоростью кристаллизации.

В сплавах, кристаллизующихся в значительном интервале температур, размер зерна в наружной и внутренней частях отливки при одинаковой средней скорости кристаллизации различный. Причем, размер зерна в осевой части отливки, как правило, оказывается мельче, чем в наружной при той же средней скорости кристаллизации. Возможно, что в широкой области затвердевания создаются более благоприятные условия для возникновения центров кристаллизации [4].

Кроме того, даже поверхностный анализ графиков (рис. 4) показывает, что увеличение скорости затвердевания начинается уже на половине радиуса отливки.

Таким образом, ускорение затвердевания осевой зоны отливки фиксируется во всех видах сплавов, а ликвация химических элементов не может быть причиной этого процесса.

Теплофизическая модель ускоренного затвердевания центральных зон отливок, предлагаемая в данной работе, базируется на следующих положениях:

- в процессе затвердевания происходит нагрев литейной формы и уменьшается количество тепла, которое отводится от отливки (это установлено экспериментальными замерами для песчаных и кокильных форм, а также отливок, имеющих форму шара, цилиндра и пластины [2-4, 8, 9]);

- затвердевание центральных зон отливок происходит по гетерогенному механизму (в рассматриваемый момент времени расплав уже содержит твердую фазу, а, например, границы солидуса и выливания соответствуют температурам, которые меньше ликвидуса);

- ускоренное затвердевание центральных зон отливок обусловлено увеличением количества растущих центров кристаллизации на единицу объема (поверхности) при сужении фронта затвердевания в осевой зоне.

Если количество центров кристаллизации, растущих от поверхности отливки, принять равным  $K$ , то их количество на единицу поверхности шаровой отливки  $K_R$  составит

$$K_R = \frac{K}{S_R}, \quad (1)$$

где  $S_R$  – площадь поверхности шаровой отливки радиусом  $R$ .

В процессе затвердевания уменьшается толщина незатвердевшего слоя металла с  $R$  до  $r$ . Если в первом приближении принять одинаковое количество растущих центров кристаллизации  $K$  на поверхности и в глубине отливки, то при радиусе  $r$  их количество на единицу поверхности шаровой отливки  $K_r$  составит

$$K_r = \frac{K}{S_r}, \quad (2)$$

где  $S_r$  – площадь поверхности шаровой отливки радиусом  $r$ .

Приравняв (1) и (2) и выразив площадь  $S$  через радиус, получим

$$K_r = K_R \frac{R^2}{r^2}. \quad (3)$$

Если по аналогичной схеме рассчитать количество центров кристаллизации, растущих от поверхности отливки, на единицу объема шаровой отливки, то получим

$$K_R = \frac{K}{V_R}, \quad (4)$$

где  $V_R$  – объем шаровой отливки радиусом  $R$ .

В процессе затвердевания уменьшается толщина незатвердевшего слоя металла с  $R$  до  $r$ . Если в первом приближении принять одинаковое количество растущих центров кристаллизации  $K$  на поверхности и в глубине отливки, то при радиусе  $r$  их количество на единицу объема шаровой отливки  $K_r$  составит

$$K_r = \frac{K}{V_r}, \quad (5)$$

где  $V_r$  – объем шаровой отливки радиусом  $r$ .

Приравняв (1) и (2) и выразив объем через радиус, получим

$$K_r \frac{4}{3} \pi r^3 = K_R \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (6)$$

или

$$K_r = K_R \frac{r^3}{R^3}.$$

Результаты расчетов изменения количества центров кристаллизации на единицу поверхности и объема отливки при уменьшении толщины незатвердевшего слоя сведены в таблице.

Так, при затвердевании шаровой отливки для оставшейся незатвердевшей  $0,5 R$  толщины отливки количество центров кристаллизации на единицу поверхности будет в 4 раза больше, чем при радиусе  $R$  ( $N_r = 4N_R$  в таблице). Если сравнивать количество

## Затвердевание сплавов

центров кристаллизации на единицу объема шаровой отливки при  $r = R/2$ , то их количество в 8 раз больше, чем у поверхности отливки ( $K_r = 8 K_R$ ).

При затвердевании шаровой отливки для оставшейся 1/3 незатвердевшей осевой зоны количество центров кристаллизации на единицу поверхности будет в 9 раз больше, чем при радиусе  $R$  ( $N_r = 9N_R$  в таблице). Если сравнивать количество дендритов на единицу объема шаровой отливки при  $r = R/3$ , то их количество в 27 раз больше, чем у поверхности отливки ( $K_r = 27 K_R$ ).

### Изменение количества центров кристаллизации на единицу поверхности и объема фронта затвердевания отливки при уменьшении толщины незатвердевшего слоя

Количество центров кристаллизации при уменьшении толщины незатвердевшего слоя отливки от $R$ до $r$	Размеры незатвердевшей зоны отливки	Форма отливки		
		плоская полубесконечная пластина	цилиндр полубесконечный	шар
На единицу поверхности фронта затвердевания ( $N$ , шт/мм <sup>2</sup> )	$R > r$	$N_r = N_R$	$N_r = N_R \frac{R}{r}$	$N_r = N_R \frac{R^2}{r^2}$
	$r = R/2$	$N_r = N_1$	$N_r = 2N_R$	$N_r = 4N_R$
	$r = R/3$	$N_r = N_1$	$N_r = 3N_R$	$N_r = 9N_R$
На единицу объема фронта затвердевания ( $K$ , шт/мм <sup>3</sup> )	$R > r$	$K_r = K_R \frac{R}{r}$	$K_r = K_R \frac{R^2}{r^2}$	$K_r = K_R \frac{R^3}{r^3}$
	$r = R/2$	$K_r = 2K_R$	$K_r = 4K_R$	$K_r = 8K_R$
	$r = R/3$	$K_r = 3K_R$	$K_r = 9K_R$	$K_r = 27K_R$

Для цилиндрической полубесконечной отливки при  $r = R/2$  количество центров кристаллизации на единицу поверхности увеличивается в 2 раза, а на единицу объема – в 4 (таблица). При  $r = R/3$  количество центров кристаллизации на единицу поверхности увеличивается в 3 раза, а на единицу объема – в 9 (таблица).

Для плоской полубесконечной отливки увеличение количества центров кристаллизации происходит только при расчете на единицу объема: в 2 раза при  $r = R/2$  и в 3 – при  $r = R/3$ .

Таким образом, основной причиной ускоренного затвердевания центральных зон отливок из различных сплавов является увеличение количества центров кристаллизации при сужении фронта затвердевания в осевой зоне шаровых, цилиндрических и плоских отливок.

#### Выводы

- Затвердевание осевой зоны отливок шаровой, цилиндрической и плоской форм из алюминия, его сплавов с кремнием, железа и его сплавов с углеродом происходит со скоростью, соизмеримой со скоростью затвердевания металла у поверхности формы. Ликвация химических элементов не может быть причиной этого процесса.

- Предложена 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.

- Расчеты показали, что после затвердевания половины радиуса шаровой отливки количество центров кристаллизации на единицу поверхности фронта затвердевания

## **Затвердевание сплавов**

будет в 4 раза больше, чем у поверхности отливки, а на единицу объема незатвердевшего металла их количество в 8 раз больше, чем у поверхности отливки.

- При затвердевании осевой зоны шаровой отливки ( $r = R/3$ ) количество центров кристаллизации на единицу поверхности фронта затвердевания будет в 9 раз больше, чем у поверхности отливки, а на единицу объема незатвердевшего металла в 27 раз больше, чем у поверхности отливки.

- После затвердевания половины радиуса цилиндрической полубесконечной отливки количество центров кристаллизации на единицу поверхности фронта затвердевания увеличивается в 2 раза, а на единицу объема – в 4 по сравнению с затвердеванием у поверхности литейной формы. При затвердевании осевой зоны ( $r = R/3$ ) количество центров кристаллизации на единицу поверхности фронта затвердевания в 3 раза больше, а на единицу объема – в 9.

- Для плоской полубесконечной отливки увеличение количества центров кристаллизации происходит только при расчете на единицу объема незатвердевшего металла: в 2 раза при затвердевании половины отливки и в 3 – при затвердевании осевой зоны ( $r = R/3$ ).



### **Список литературы**

1. Бунины К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н. Основы металлографии чугуна. – М.: Металлургия, 1969. – 415 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. Гуляев Б. Б. Литейные процессы. – М.; Л.: Машгиз, 1960. – 416 с.
5. Кривошеев А. Е. Литые валки. – М.: Металлургиздат, 1957. – 360 с.
6. Затвердевание металлов и металлических композиций / В. А. Лейбензон, В. Л. Пилюшенко, В. М. Кондратенко и др. – Киев: Наук. думка, 2009. – 410 с.
7. Зональная ликвация в крупных чугунных отливках / В. Е. Хрычиков, Н. П. Котешов, В. М. Снаговский, А. Е. Кривошеев // Литейн. пр-во. – 1983. № 6. – С. 26-28.
8. Вейник А. И. Теория затвердевания отливок. – М.: Машгиз, 1960. – 435 с.
9. Хрычиков В. Е. Термокинетические условия образования усадочных дефектов в чугунных прокатных валках // Процессы литья. – 1996. – № 1. – С. 24-31.

Поступила 24.09.2012

\*\*\*\*\*

### **Уважаемые подписчики!**

*Подписаться на журнал «Процессы литья»  
через Интернет  
можно на сайте ГП «Пресса» [www.presa.ua](http://www.presa.ua)  
с помощью сервиса «Подписка On-line».*

\*\*\*\*\*