

**С. Е. Кондратюк, Р. А. Воробель*, И. М. Стась,
Е. Л. Бречко, Г. И. Бавда***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ В СВЯЗИ С УСЛОВИЯМИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Исследованы закономерности изменения дисперсности и морфологии дендритного строения в отливках сталей марок 20Л, 45Л и У7Л в зависимости от условий кристаллизации при нормальном и интенсивном теплоотводе. Сделана количественная оценка характеристик дендритной структуры.

Досліджено закономірності зміни дисперсності та морфології дендритної будови у виливках сталей марок 20Л, 45Л та У7Л в залежності від умов кристалізації при нормальному та інтенсивному тепловідборі. Зроблено кількісну оцінку характеристик дендритної структури.

The relationship of changing the dispersion and morphology of the tree-like structure in 20L, 45L and U7L steel castings depending on crystallization conditions under normal and intensive heat removal have been investigated. The quantitative estimation of the characteristics of the tree-like structure has been fulfilled.

Ключевые слова: сталь, кристаллизация, отливка, дендритная структура.

Особенности дендритного строения содержат важную информацию о процессах кристаллизации и структурообразования в реальных объемах металла и во многом определяют уровень физико-механических свойств отливок. Применение режимов ускоренного и регламентированного теплоотвода при кристаллизации позволяет целенаправленно воздействовать на дисперсность и морфологию литой структуры и фазово-структурное состояние литых изделий. Заложенные при кристаллизации особенности дендритного строения сохраняют свое влияние на структуру и свойства после операций окончательной термической обработки отливок.

Исходя из этого, количественная оценка дендритной структуры в связи с условиями кристаллизации является одним из основных критериев оценки и прогнозирования свойств литых изделий [1]. С учетом этого исследовано влияние температурно-временных условий кристаллизации на формирование и особенности дендритной структуры сталей марок 20Л, 45Л и У7Л в отливках, затвердевающих в условиях нормального и интенсивного теплоотвода.

Исследованы структурные особенности по сечению прямоугольных отливок размером 115×130×200 мм, полученных при кристаллизации сталей в условиях одностороннего теплоотвода с использованием литейных форм с различной теплоотводящей способностью. Комбинированная литейная форма обеспечивала охлаждение торца отливок с разной интенсивностью охлаждения расплава за счет использования водоохлаждаемого медного кристаллизатора (интенсивный теплоотвод) или песчано-глинистой вставки (нормальный теплоотвод).

Для выявления дендритной структуры поверхность шлифов макротемплетов отливок протравливали реактивом Стэда [2]. Количественную оценку дендритной структуры в отливках исследуемых сталей производили с использованием характеристик дисперсности дендритной структуры (ДДС), плотности дендритной структуры (ПДС), длины и ширины дендритов [3]. Каждая из этих характеристик отражает определенные особенности строения дендритной структуры и непосредственно связана с тем или иным параметром кристаллизации.

Кристаллизация и структурообразование сплавов

Металлографически установлено (рис. 1), что формирование первичной литой структуры в отливках исследуемых сталей в зависимости от условий теплоотвода сопровождается образованием дендритных кристаллов различной дисперсности и морфологии. Показано, что в случае применения интенсивного теплоотвода характеристики плотности и дисперсности дендритной структуры по глубине отливки закономерно повышаются (табл. 1). Так, плотность дендритной структуры непосредственно у торцевой поверхности отливки возрастает приблизительно в 1,75 раза (стали марок 20Л и 45Л) и 1,3 (сталь У7Л) и

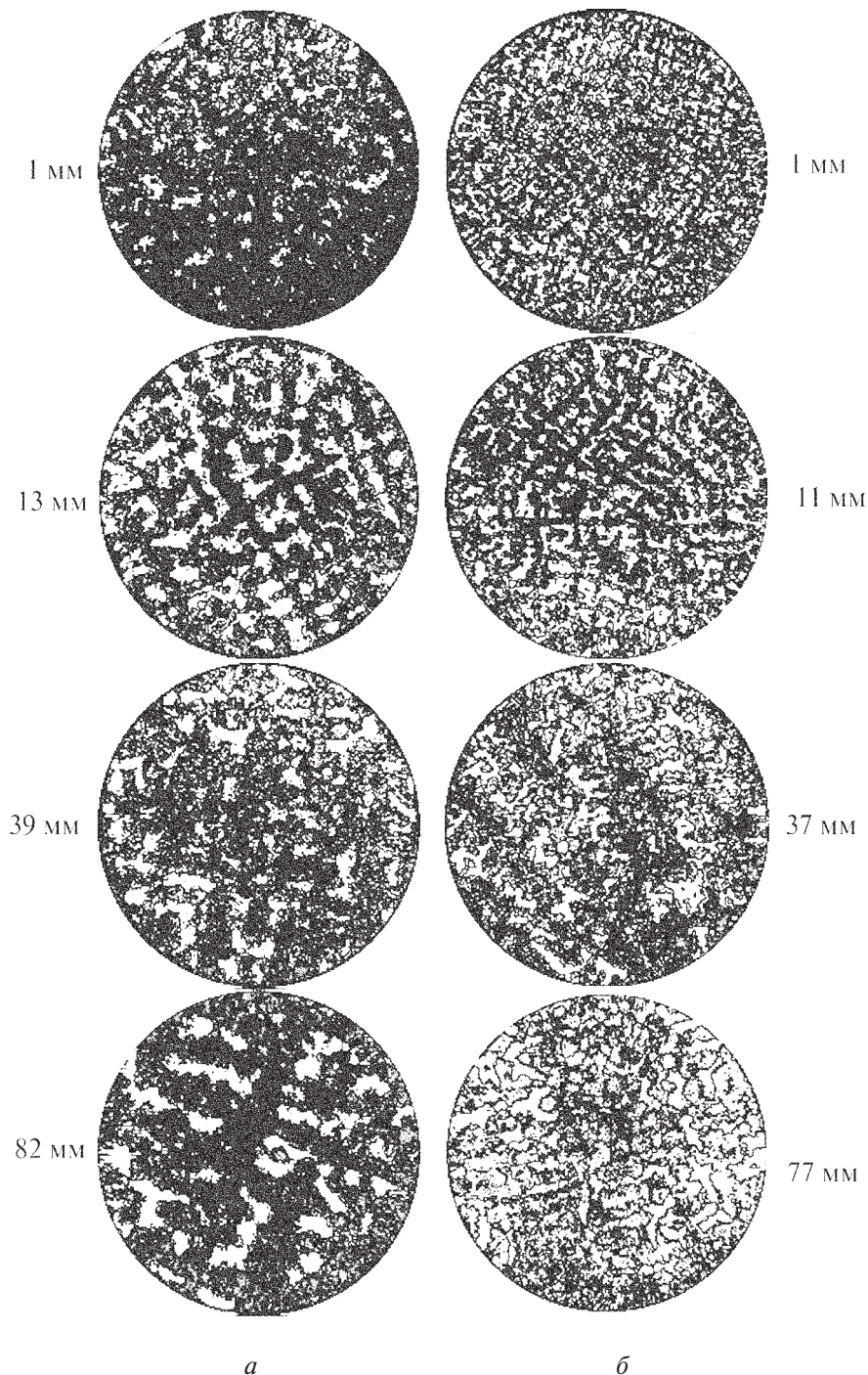


Рис. 1. Структуры стали У7Л по сечению отливки в условиях нормального (а) и интенсивного (б) охлаждения; цифры возле изображений структур – расстояние от торца отливок, $\times 100$

Таблица 1. Изменение плотности и дисперсности дендритной структуры сталей в связи с условиями кристаллизации

Марка стали	Характеристика дендритной структуры	Расстояние от торца, мм								
		1	5	12	20	39	60	82	115	150
20Л	ПДС	$\frac{2,65}{4,60}$	$\frac{2,10}{3,50}$	$\frac{1,65}{2,30}$	$\frac{1,50}{1,75}$	$\frac{1,30}{1,50}$	$\frac{1,25}{1,40}$	$\frac{1,18}{1,30}$	$\frac{1,10}{1,20}$	$\frac{1,10}{1,15}$
	ДДС	$\frac{43,50}{90,00}$	$\frac{32,50}{75,00}$	$\frac{22,50}{48,50}$	$\frac{18,00}{34,00}$	$\frac{13,00}{24,00}$	$\frac{11,00}{17,00}$	$\frac{10,25}{13,00}$	$\frac{9,50}{10,50}$	$\frac{9,50}{10,50}$
45Л	ПДС	$\frac{2,40}{4,20}$	$\frac{1,90}{2,80}$	$\frac{1,60}{1,85}$	$\frac{1,38}{1,55}$	$\frac{1,09}{1,21}$	$\frac{0,93}{1,01}$	$\frac{0,85}{0,93}$	$\frac{0,77}{0,80}$	$\frac{0,70}{0,75}$
	ДДС	$\frac{40,00}{80,00}$	$\frac{25,00}{52,50}$	$\frac{14,50}{35,50}$	$\frac{12,00}{24,50}$	$\frac{10,50}{19,50}$	$\frac{9,00}{15,00}$	$\frac{7,50}{11,00}$	$\frac{7,00}{9,00}$	$\frac{7,00}{7,50}$
У7Л	ПДС	$\frac{1,75}{2,30}$	$\frac{1,50}{1,85}$	$\frac{1,30}{1,57}$	$\frac{1,20}{1,40}$	$\frac{1,05}{1,20}$	$\frac{0,96}{1,25}$	$\frac{0,90}{1,05}$	$\frac{0,90}{1,05}$	$\frac{0,90}{1,05}$
	ДДС	$\frac{28,00}{50,00}$	$\frac{22,00}{37,00}$	$\frac{18,50}{28,50}$	$\frac{16,50}{25,00}$	$\frac{15,00}{23,00}$	$\frac{13,00}{20,80}$	$\frac{12,50}{19,00}$	$\frac{12,00}{17,00}$	$\frac{11,500}{15,50}$

Примечание: в числителе – нормальное охлаждение; в знаменателе – интенсивное охлаждение

составляет: для стали 20Л – 4,6; стали 45Л – 4,2 и стали У7Л – 2,3. В условиях нормального теплоотвода плотность дендритной структуры равняется 2,65 (сталь 20Л); 2,4 (сталь 45Л) и 1,75 (сталь У7Л). Влияние теплоотвода как нормального, так и интенсивного, наиболее сильно проявляется на расстоянии приблизительно до 20-30 мм от торца отливка. Далее изменение плотности дендритной структуры по глубине отливок является незначительным.

Дисперсность дендритной структуры, определенная для отливок, полученных в условиях нормального теплоотвода, заметно уменьшается до глубины 20-30 мм от поверхности отливки. На большем удалении от торца изменение этого параметра является незначительным. В случае интенсивного теплоотвода значения дисперсности дендритной структуры, определенные у поверхности теплоотвода, превышают в 2,1 (сталь 20Л); 2,0 (сталь 45Л) и 1,8 раза (сталь У7Л) соответствующие значения этого параметра, полученные для условий нормального теплоотвода. Влияние интенсивного теплоотвода распространяется на глубину до 50-60 мм от торца отливки.

Таблица 2. Длина осей дендритов в различных структурных зонах стальных отливок

марка стали		Длина осей, мм					
		20Л		45Л		У7Л	
Условия охлаждения		нормальное	интенсивное	нормальное	интенсивное	нормальное	интенсивное
Корковая зона (I)		0,20	0,30	0,20	0,25	0,16	0,22
Зона столбчатых дендритов (II)	короткоосные (a ₁)	2,00	25,0-3,00	2,00	2,70	1,70	2,50
	длинноосные (a ₂)	13,00	17,00	7,00	10,00	6,00	9,00
Зона разориентированного роста дендритов (III)		6,00-11,00	3,00-6,00	6,00-9,00	6,50-7,50	6,00-7,00	5,50-6,00
Зона равноосных дендритов (IV)		3,00-6,00	3,00-5,00	3,00-4,00	3,00-4,50	3,00-3,80	2,80-4,20

Таблица 3. Изменение ширины дендритов по сечению отливок сталей в зависимости от условий теплоотвода при кристаллизации

марка стали	условия охлаждения	Ширина дендритов, мм								
		расстояние от торца, мм								
		1	5	12	20	39	60	82	115	150
20Л	нормальное	0,037	0,049	0,071	0,089	0,123	0,146	0,158	0,168	0,168
	интенсивное	0,018	0,021	0,033	0,047	0,067	0,094	0,123	0,152	0,152
45Л	нормальное	0,040	0,064	0,110	0,129	0,152	0,178	0,213	0,228	0,229
	интенсивное	0,020	0,031	0,046	0,062	0,082	0,107	0,145	0,178	0,213
У7Л	нормальное	0,057	0,073	0,080	0,097	0,107	0,122	0,128	0,132	0,139
	интенсивное	0,032	0,043	0,056	0,064	0,070	0,077	0,084	0,095	0,103

Изменение дендритной структуры характеризуют также геометрические параметры дендритов – длина и ширина.

Длина осей дендритов в корковой зоне (I) и в зоне столбчатых кристаллов (II) с выделением в ней зон короткоосных (a_1) и длинноосных (a_2) дендритов имеет тенденцию к увеличению при затвердевании в условиях интенсивного теплоотвода (табл. 2). Длина дендритов в корковой зоне изменяется от 0,20 (при нормальном теплоотводе) до 0,30 мм (при интенсивном теплоотводе) для стали 20Л; от 0,20 до 0,25 мм и от 0,16 до 0,22 мм - для сталей марок 45Л и У7Л соответственно. На участке короткоосных дендритов (a_1) измене-

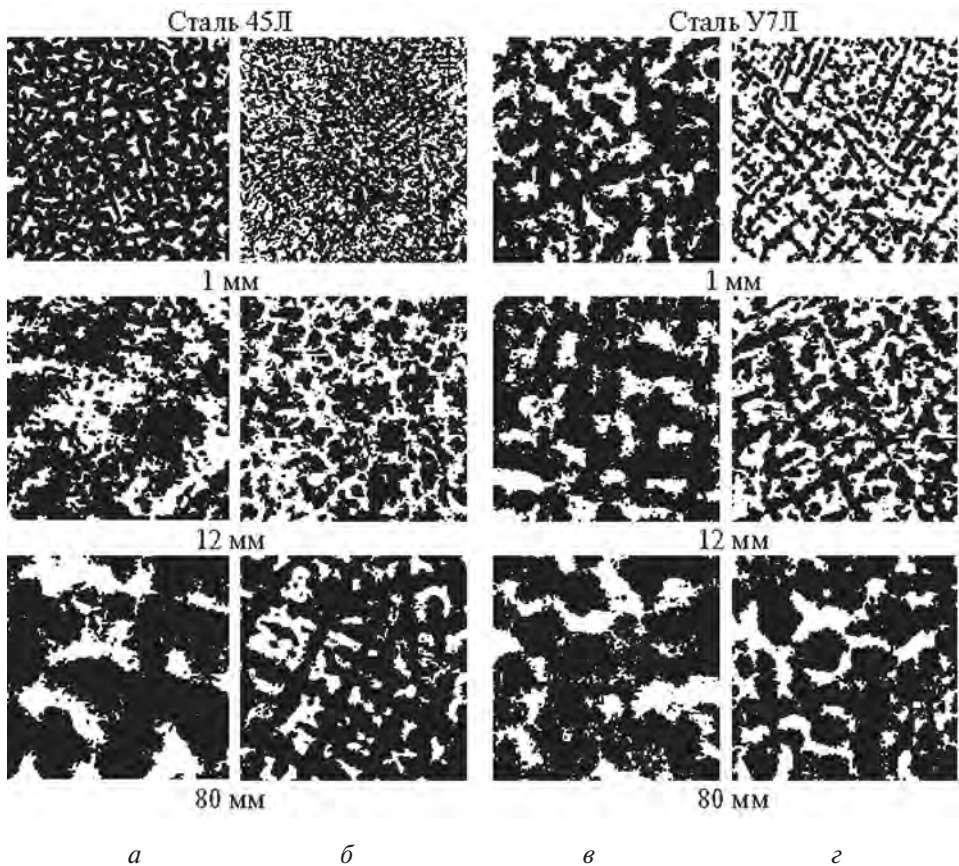


Рис. 2. Бинарные изображения структурных составляющих сталей марок 45Л и У7; а, в – нормальное охлаждение; б, г – интенсивное охлаждение; цифры возле изображений структур – расстояние от торца отливок, $\times 100$

Кристаллизация и структурообразование сплавов

ние их длины составляет для сталей марок 20Л, 45Л и У7Л от ~2,00 до ~2,50-3,00 мм; от ~2,00 до 2,70 мм и от ~1,70 до 2,50 мм соответственно. Для длинноосных дендритов (a_2) увеличение их длины в зависимости от условий теплоотвода происходит от 13,00 до 17,00 мм, от 7,00 до 10,00 мм и от 6,00 до 9,00 мм соответственно для сталей марок 20Л, 45Л и У7Л.

Однако влияние содержания углерода в сталях на длину дендритов имеет обратную зависимость по сравнению с влиянием скорости теплоотвода. Так, длина длинноосных дендритов (a_2) в стали 20Л составляет 13,00 (нормальное охлаждение) и 17,00 мм (интенсивное охлаждение), в стали 45Л длина дендритов уменьшается до 7,00 и 10,00 мм, а в стали У7Л — до 6,00 и 9,00 мм соответственно. Такая зависимость наблюдается и для короткоосных дендритов (a_1) и дендритов корковой зоны (I).

Также отмечено, что в зонах разориентированного роста дендритов и равноосных дендритов изменения длины дендритов не настолько существенны, как в рассмотренных выше, хотя описанная закономерность наблюдается и для них.

В результате подсчетов средней ширины дендритов определили, что применение интенсивного теплоотвода приводит к значительному уменьшению поперечных размеров дендритов (табл. 3). Так, в сталях марок 20Л и 45Л на расстоянии до 60 мм от торца отливок ширина дендритов в случае интенсивного теплоотвода в ~2 раза меньше по сравнению с нормальным теплоотводом. В стали У7Л различие в поперечных размерах дендритов меньше и составляет ~1,7-1,5 раза на расстоянии до ~100 мм в глубь отливки. Далее изменения ширины дендритов по сечению отливки становятся менее существенными, хотя тенденция к уменьшению размеров в случае интенсивного теплоотвода сохраняется вплоть до глубины 150 мм.

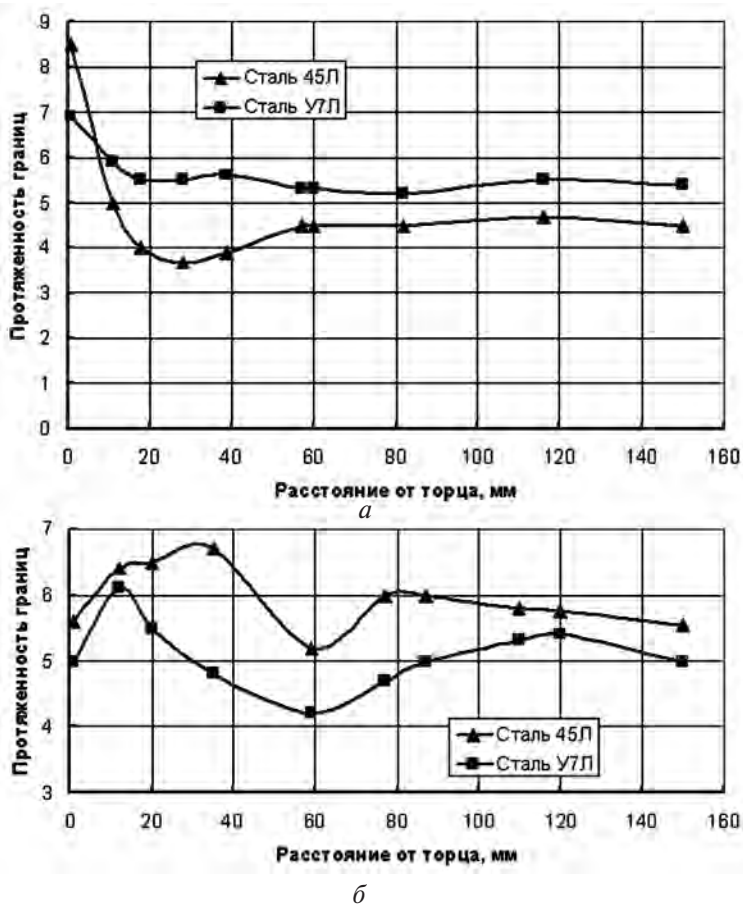


Рис. 3. Протяженность границ дендритов по сечению отливок сталей в связи с условиями кристаллизации: а — интенсивный теплоотвод; б — нормальный теплоотвод

Морфологические особенности дендритной структуры в связи с условиями кристаллизации сталей количественно оценивались также с использованием характеристик протяженности границ и разветвленности дендритов.

Для этого полученные металлографические изображения структур (см. рис. 1) преобразовывались в бинарные черно-белые изображения (рис. 2), которые пошагово обрабатывали методами пространственной фильтрации [4, 5] с целью устранения незначительных деталей. При этом использовались медианная фильтрация и морфологические преобразования бинарных изображений в скользящих окнах размером 5-7 пикселей. Для каждой экспериментальной точки анализировали до 38 изображений структуры.

Протяженность границ дендритов на бинарных изображениях оценивали в пикселях по разработанной ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ программе. Коэффициент разветвленности границ определяли как отношение общей площади структурной составляющей всего изображения к общей протяженности всех границ.

Установили, что протяженность границ дендритов по сечению отливок интенсивного тепловода закономерно уменьшается (рис. 3, а), наиболее существенно для стали 45Л на глубину 30 мм от поверхности, далее несколько возрастает и стабилизируется на глубине более 60 мм. Для стали У7Л в этих условиях кристаллизации характерно более плавное снижение указанной характеристики до глубины 20 мм. Такие изменения про-

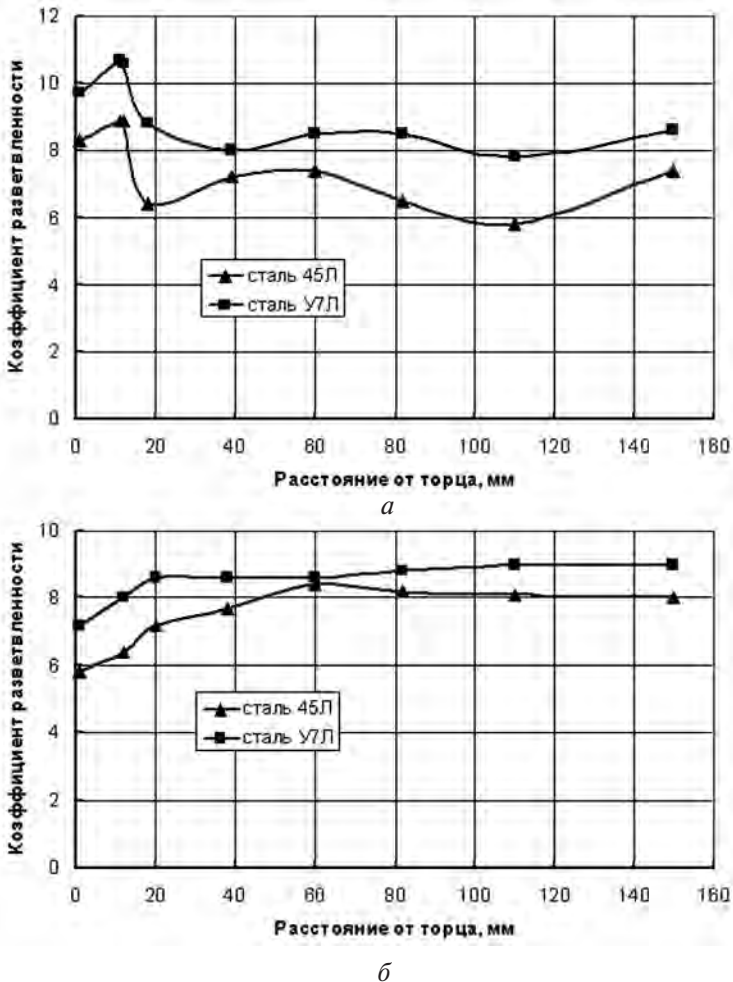


Рис. 4. Изменение коэффициента разветвленности дендритной структуры сталей по сечению отливок в зависимости от условий кристаллизации: а – интенсивный тепловод; б – нормальный тепловод

тяженности границ дендритов по сечению отливок обусловлены рядом факторов – степенью переохлаждения расплава, различной теплопроводностью сталей и формированием различных структурных зон в отливках [6].

Для случаев затвердевания отливок в условиях нормального теплоотвода (рис. 3, б) повышение протяженности границ дендритов также связано с формированием определенных структурных зон и локальным выделением тепла кристаллизации при меньшей скорости продвижения фронта кристаллизации.

Оценка дендритной структуры по показателю коэффициента разветвленности (рис. 4) также свидетельствует об определяющем влиянии температурно-временных условий кристаллизации на дисперсность и морфологию дендритов.

Таким образом показано, что при использовании режимов интенсивного теплоотвода в процессе кристаллизации сталей происходит закономерное изменение дисперсности, плотности и морфологии дендритов в соответствующих структурных зонах отливок. Установленные закономерности позволяют оптимизировать температурно-временные параметры кристаллизации и структурообразования, целенаправленно влиять на структуру и физико-механические свойства стальных отливок.



Список литературы

1. Бялік О. М., Кондратюк С. Є., Кіндрачук М. В., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія: Підручник. – Київ: ВПІ ВПК “Політехніка”, 2006. – 328 с.
2. Коваленко В. С. Металлографические реактивы. – М.: Металургия, 1970. – 136 с.
3. Браун М. П., Коваленко В. С., Зац Е. Л. Методы количественной оценки плотности дендритной структуры // Завод. лаб. – 1969. – № 1. – С. 36-39.
4. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. – New Jersey: Prentice Hall, 2002. – 1025 s.
5. Воробель Р. А., Негода С. В., Опыр Н. В., Попов Б. А. Автоматизация обработки результатов неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов: Препринт № 156. – Львов: ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины, 1989. – 47 с.
6. Кондратюк С. Є., Стоянова О. М., Стась І. М. Макроструктурні зони у виливках вуглецевих сталей // Металознавство та обробка металів. – 2008. – № 1. – С. 3-7.

Поступила 28.05.2008

Вниманию авторов!

С 2009 г. в соответствии с требованиями ВАКа все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить рецензирование, иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

Статьи в редакции поступают как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.