

УДК 669.017:669.14:621.74:549

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ЗОН В СТАЛЬНЫХ ОТЛИВКАХ

А. Ю. Борисенко

*Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины*

**Постановка проблемы.** Изучение строения и свойств стальных отливок актуально на протяжении большого периода развития металлургии, начиная от исследований Д. К. Чернова структуры «стальных болванок» [1], до проблем современных процессов непрерывной разливки стали [2–6]. Однако единая теория, которая адекватно описывала бы процесс образования различных зон металлических отливок, до сих пор отсутствует. Так, например, в работе [7] обсуждаются девять теорий кристаллизации и структурообразования отливок, названных именами их авторов: В. И. Данилова, Г. П. Иванцова, Д. Д. Саратовкина, Дж. Л. Уолкера, В. И. Добаткина, В. О. Гаген-Торна, Н. И. Хворинова, Д. К. Чернова, Г. Ф. Баландина. Оригинальная теория образования зоны равноосных кристаллов предложена А. Оно [8]. Аналогичные теории приводятся и в современной литературе [9]. Вышесказанное в равной мере относится и к металлическим слиткам. Исследования в этом направлении, однако, продолжаются [10].

Главной прикладной проблемой теории кристаллизации отливок и слитков является объяснение причин возникновения и прекращения транскристаллизации расплава с целью определения способов, предотвращающих образование зоны столбчатых кристаллов и измельчающих их зеренную структуру [2; 7]. Разработка известных теорий формирования структуры металлических отливок и слитков основывается только на общих закономерностях процессов кристаллизации веществ в природе, т.е. их фазового перехода из жидкого состояния в твердое монокристаллическое. Особенность – же структуры стальных отливок и слитков является наличие границ раздела между различно ориентированными монокристаллами дендритной формы (дендритов), что характеризует их строение, как поликристаллическое, т.е. зеренное. Часто слово «кристалл» употребляется, как синоним слова «зерно» с равнозначным использованием в научной литературе понятий «равноосные кристаллы» и «равноосные зерна» [2; 7]. В свою очередь, зеренное строение литых металлов часто отождествляется с дендритным строением, что, как показано в работах [11–14], таковым не является, хотя они между собой и связаны. Однако считается, что именно зеренная структура (размер зерен, их форма и преимущественная ориентировка) оказывает основное влияние на свойства литых металлов и сплавов [6].

В связи с этим, возникают вопросы: какова роль дендритной кристаллизации в формировании зеренной структуры стали, и как она влияет на образование зонного строения металлических отливок и слитков? Вышесказанное обуславливает актуальность исследования связи дендритного строения с зеренной структурой стали для объяснения причин образования различных структурных зон отливок и слитков.

**Цель работы.** Целью работы являлось установление связи структурных зон стальных отливок с их дендритным и зеренным строением.

**Материал и методика исследований.** Материалом для исследования служили образцы отливок малых сечений из стали различного химического состава, полученных в лабораторных условиях:

1. Стержень диаметром 6,1 мм, длиной 120 мм из стали с 0,25 % С, 0,96 % Si, 0,59 % Mn получен путем кристаллизации в кварцевой трубке после расплавления стали (1600 °С) в индукционной печи.

2. Цилиндрическая отливка диаметром 25 мм, высотой 20 мм из стали с 0,62 % С, 0,32 % Si, 0,65 % Mn получена кристаллизацией в алундовом тигле после расплавления стали (1 540 °С) в печи сопротивления с последующей закалкой от 1 400 °С при охлаждении кристаллизующейся отливки.

3. Быстроохлажденные образцы толщиной ~1 мм из стали с 1,20 % С, 10 % Mn, 0,05 % Si получены «наморозкой» жидкой стали на молибденовый стержень при ее продувке (1 580...1 680° С) кислородом в 200-килограммовой индукционной печи.

4. Быстроохлажденные образцы каплеобразной формы массой 0,5 грамма из стали с 0,83 % С, 0,23 % Si, 0,53 % Mn получены методом «стоп-закалки» после расплавления стали при 1 650 °С.

Получение отливок по п.п. 2–4 и методика их исследования подробно описаны ранее в работах [14; 15]. Малые размеры отливок позволили методически более достоверно изучить их микростроение по всему сечению.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Изучение поверхности микрошлифа отливки из стали с 0,25 % С невооруженным глазом, а также исследование ее микроструктуры, выявленной травлением в 4%-ном растворе азотной кислоты («нитале»), при небольших микроскопических увеличениях (рис. 1, *а*) показывает наличие в ней двух структурных зон (указаны стрелками):

1 – зона ориентированных зерен от поверхности к центру отливки;

2 – зона неориентированных, относительно равноосных зерен.

Структура внутри зерен перлитная; по границам зерен выделяется доэвтектоидный феррит (рис. 1, *б*).

В общих чертах строение отливки, определяемое по морфологии зерен, соответствует классической схеме строения отливок и слитков (рис. 1, *в*). Исключением является отсутствие в ее структуре выраженной зоны мелких равноосных зерен, приводимой практически всегда на схемах строения отливок, но часто не наблюдаемой в действительности.

Исследование микроструктуры отливки из стали с 0,25 % С, выявленной по следам дендритной ликвации путем травления в пикрате натрия («пикрате») по методике [14; 15], обнаруживает в ней три структурные зоны, указанные стрелками на рис. 2, *а, б*:

1 – приповерхностная зона, распространяющаяся от края вглубь образца приблизительно на 1/5 его радиуса, которая характеризуется наличием густо и относительно равномерно точно расположенных ликвационных межселевых и междендритных участков, травящихся более интенсивно вследствие обогащения С, Si, Mn, P;

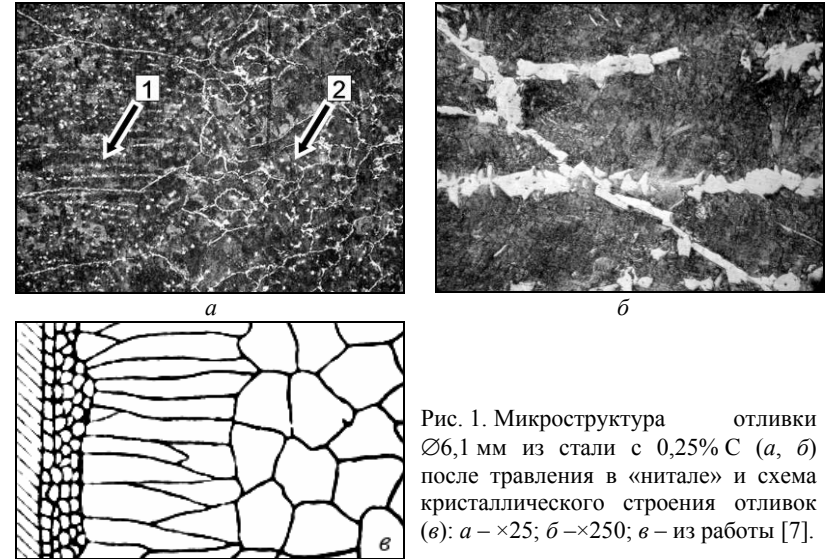


Рис. 1. Микроструктура отливки  $\varnothing 6,1$  мм из стали с 0,25% С (а, б) после травления в «нитале» и схема кристаллического строения отливок (в): а –  $\times 25$ ; б –  $\times 250$ ; в – из работы [7].

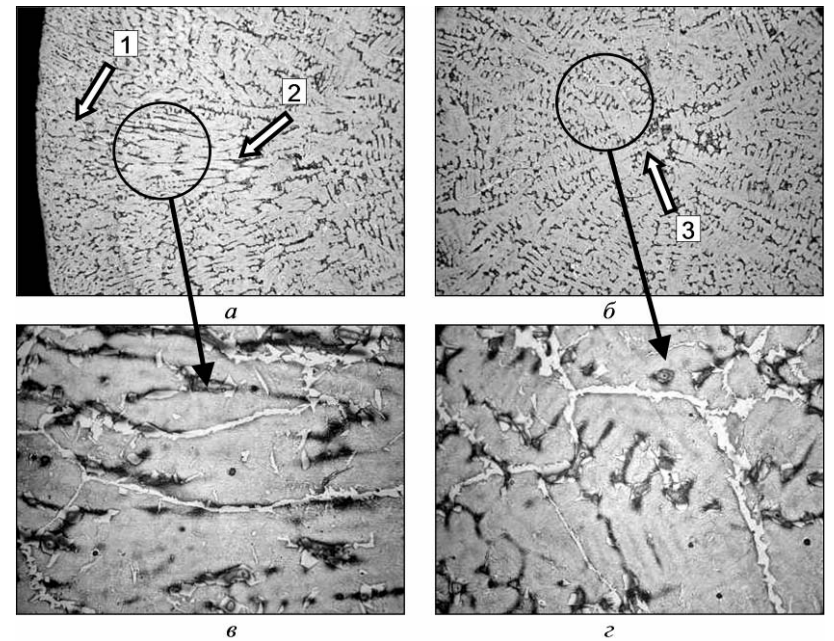


Рис. 2. Микроструктура отливки  $\varnothing 6,1$  мм из стали с 0,25 % С после травления в «пикрате»: а, б –  $\times 25$ ; в, г –  $\times 125$

2 – промежуточная зона, которая распространяется от приповерхностной области 1 к центральной области 3 и характеризуется наличием радиально направленных, несимметричных дендритов;

3 – центральная зона, которая характеризуется схождением в центре отливки радиально расположенных дендритов, имеющих относительно зоны 2 более равноосную и разветвленную форму.

Травление в «пикрате» на фоне дендритной структуры стали с 0,25 % C выявляет также границы бывших аустенитных зерен, вдоль которых образуется доэвтектоидный феррит (рис. 2, в, з). При этом наблюдается соответствие морфологии зерен, выявляемых травлением в «нитале». Однако травление в «пикрате» дает больше информации о связи зеренной структуры отливки с дендритным строением. Из рисунка 2, в видно, что расположение границ ориентированных зерен, выявляемых по ферритной сетке, преимущественно совпадает с расположением радиально направленных ликвационных участков дендритной структуры. В центральной зоне отливки наблюдается больше границ зерен, проходящих по внутридендритным областям, с частым изменением ориентации при контакте с ликвационными участками или при их пересечении (рис. 2, з). В общем случае ширина сетки доэвтектоидного феррита ( $h$ ) зависит от ее расположения относительно ликвационных участков дендритной структуры. В осях дендритов и в участках, прилежащих к их ликвационным зонам, ширина ферритной сетки, как правило, больше, чем в самих ликватах. Поскольку границы зерен являются местами гетерогенного зарождения феррита при  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращении, то очевидно, что, при прочих равных условиях, наблюдаемые различия в строении феррита должны быть связаны с различиями строения самих границ. Расположение границ зерен относительно ликвационных участков дендритной структуры в исследуемой отливке схематически представлено на рисунке 3.

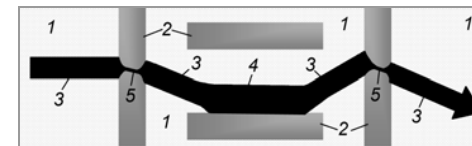


Рис. 3. Схема расположения границы зерна относительно ликвационных участков дендритной структуры в отливке из стали с 0,25 % C: 1 – внутридендритные участки; 2 – ликвационные участки; 3, 4, 5 – граница зерна с разной шириной образующегося на ней феррита ( $h_4 > h_3 > h_5$ )

В работе [14] процесс перехода дендритной структуры литой стали в зеренную был уподоблен растрескиванию материалов под действием внутренних напряжений. Подтверждением этого явились результаты исследования фрагментации дендритной структуры стали в зеренную вследствие специально созданного внешнего нагружения путем горячей пластической деформации [16]. Было показано, что при повышении степени

деформации литой стали с 0,59 % С от 0 до 40...50 % увеличивается фрагментация дендритной структуры, измельчение зерна и выравнивание количества доэвтектоидного феррита, образующегося при распаде аустенита в междендритных и осевых участках дендритов. Объясняется это тем, что прочность осевых участков меньше, чем междендритных из-за большего содержания в последних С, Si, P и Mn [17]. Поэтому деформация при небольших степенях происходит в первую очередь в осевых участках дендритов. Повышение степени деформации способствует увеличению уровня напряжений, достаточного для ее осуществления и в более прочных – ликвационных зонах.

Попытаемся с этих позиций представить и процесс образования различных структурных зон отливки. Если в работах [16; 17] напряжения для осуществления пластической деформации, фрагментирующей дендритную структуру литой стали, были вызваны внешним нагружением, то для кристаллизующейся отливки имеющиеся в ней напряжения являются внутренними и обусловлены усадкой затвердевающего металла, перепадом температуры различных частей отливки, а также фазовыми превращениями в стали [18]. Первые два фактора вносят основной вклад в общий уровень литейных напряжений Fe–С сплавов. Величина усадочных напряжений прямо пропорциональна коэффициенту усадки, значения которого максимальны при температурах кристаллизации. В работе [2] расчетными методами показано, что продвижение фронта кристаллизации вглубь слитка сопровождается уменьшением максимума термических напряжений по сечению кристаллизующейся корочки стального слитка, которые для всех стадий процесса сохраняются растягивающими. Для сохранения сплошности металла допустимый перепад температур по сечению твердой оболочки должен быть не более 150 К. Однако, например, при непрерывном литье листовых стальных слитков реальный перепад температуры в твердой оболочке достигает 300...350 К, что может приводить к нарушениям сплошности металла в непосредственной близости от «границы твердения», т. е. в двухфазной зоне слитка [2].

Эти данные позволяют утверждать, что процесс формирования границ зерен в стали, как аналог процесса пластической деформации и разрушения материалов, может осуществляться при весьма высоких температурах – непосредственно сразу после кристаллизации или одновременно с ней. Поскольку образование дендритной структуры – это процесс фазового перехода с формированием кристаллического строения стали, которое в идеальном случае – монокристаллическое, то этот процесс является первичным. В зависимости от уровня напряжений и реологических свойств закристаллизовавшегося металла следующим процессом будет его упругая и пластическая деформация, вплоть до разрушения. Принципиально этот процесс аналогичен геологическим явлениям [19, 20], при которых сначала образуются первичные структурные формы горных пород, т. е. одновременно с формированием самой породы, а затем вторичные, возникающие в результате последующих деформаций первичных структурных форм. Так, например, образуется структура осадочных горных пород, известным

представителем которых служит морская галька (рис. 4). На рис. 5 показаны микроструктуры образцов быстроохлажденных сталей с 1,2 % С, 10 % Mn и 0,83 % С, являющихся еще примерами связи дендритного строения с

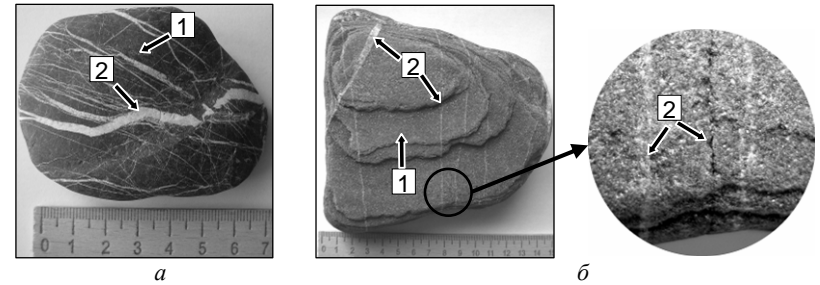


Рис. 4. Морская галька – пример образования первичных (1) и вторичных (2) структурных форм осадочных горных пород

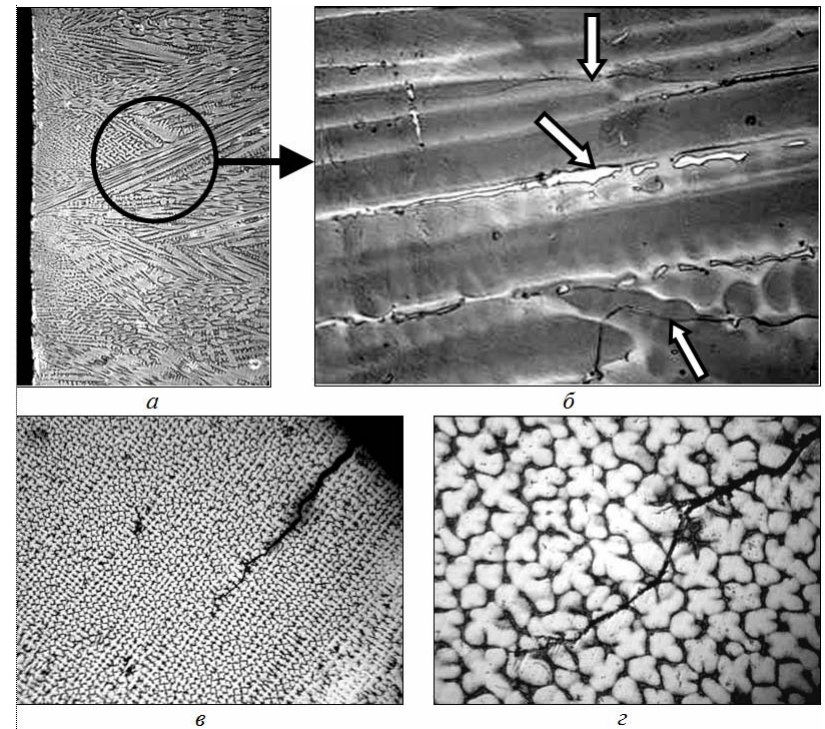


Рис. 5. Микроструктура быстроохлажденных сталей с 1,2% С, 10% Mn (а, б) и 0,83% С (в, г) после травления в «пикрате»: а, в –  $\times 50$ ; б –  $\times 500$ ; г –  $\times 250$

расположением границ зерен (указаны стрелками на рис. 5, а, б) и распространением трещины (рис. 5, в г).

При таком объяснении причин образования зеренной структуры металлов и, как частного случая, литой стали необходимо основываться не только на закономерностях процессов кристаллизации, а и на общих физических законах разрушения материалов [21] с учетом, естественно, особенностей химического состава, реологических свойств, условий деформации и затрагиваемых ею иерархических уровней строения вещества [22; 23]. Это весьма важно, т. к. использование знаний из указанных областей науки позволит более объективно описывать, объяснять и прогнозировать структуру стали и металлических отливок.

На основании того, что возникновение дендритов является первичным процессом структурообразования отливок, а границ аустенитных зерен – вторичным, а также взаимосвязи этих структур можно заключить, что пространственная ориентация дендритов влияет на расположение границ зерен аустенита в отливке. Радиально направленные дендриты ориентируют положение границ зерен от поверхности к ее центру, а формирование дендритов равноосной формы способствует образованию равноосных зерен.

Так как закристаллизовавшийся  $\delta$  или  $\gamma$  твердый раствор железа испытывает пластическую деформацию под действием релаксирующих напряжений, то процесс образования структурных зон стальной отливки можно представить, как последовательные этапы направленного формирования и разрушения монокристаллического строения соответствующих твердых растворов железа. В этом случае кристаллизационные процессы являются подготовительными – формирующими твердое кристаллическое строение стали для последующей его пластической деформации. Основные следствия этих процессов: 1 – возникновение определенного строения атомно-кристаллической решетки железа, характеризующегося дефектностью, кристаллографической текстурой и анизотропией; 2 – образование химической неоднородности полиморфных модификаций  $\delta$ - и  $\gamma$ -Fe, обусловленной фазовыми превращениями  $\delta \rightarrow \gamma$ ,  $\gamma \rightarrow \delta$ ; 3 – появление меж- и внутрифазных границ; 4 – возникновение растягивающих или сжимающих внутренних напряжений различной величины и распределения.

В кристаллизующейся отливке происходит неравномерная релаксация напряжений в структурно и химически анизотропной среде, что приводит к неравномерной пластической деформации стали, как по объему отливки, так и локально на атомно-кристаллическом уровне. Градиент температуры и напряжений от поверхности к центру отливки вызывает соответствующее направление деформации, которая для литого монокристаллического состояния стали при высоких температурах осуществляется путем скольжения дислокаций. Скольжение дислокаций зависит и от кристаллографической текстуры роста кристаллов металла – основы, а также качественного и количественного состава растворенных в нем атомов других элементов. Последние, являясь примесными или легирующими компонентами сплава, затрудняют скольжение дислокаций и повышают прочность металлов.

Это обстоятельство весьма важно, т. к. кристаллизация стали сопровождается дендритной ликвацией растворенных в железе инородных атомов с обогащением ими межселевых и междендритных промежутков. Поэтому скольжение дислокаций в этих местах дендритов  $\delta$ - или  $\gamma$ -Fe затрудняется с изменением траектории образования границы зерна или вообще прекращается. Часто, однако, пластическая деформация распространяется в приграничных с ликватами участках (рис. 2, *в*; 5, *б*; 6, *в*). Неоднородная пластическая деформация приводит к образованию различного

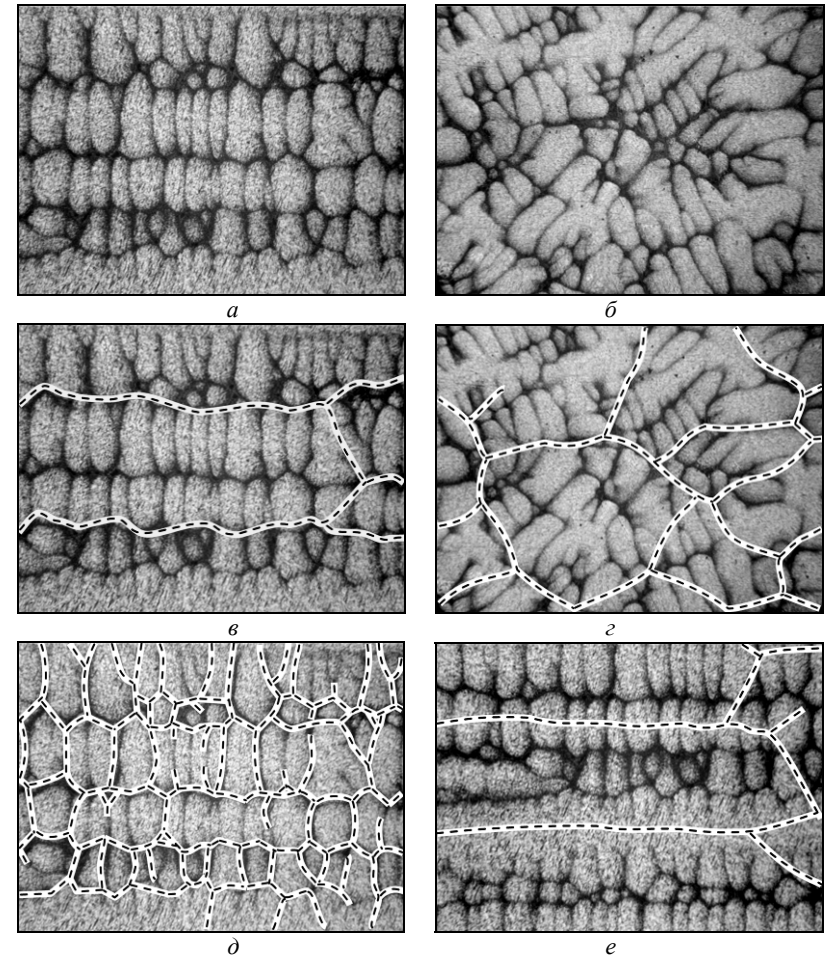


Рис. 6. Реконструкции связи дендритного строения с границами зерен в различных зонах стальных отливок (пояснения в тексте)  $\times 125$



дислокационного строения границ аустенитных зерен, вызывающего неодинаковое развитие вдоль них полиморфного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения с образованием ферритной сетки разной ширины (рис. 3) и химического состава [17].

На рисунке 6 приведены некоторые варианты реконструкции связи дендритного строения стали с 0,62 % С с границами зерен в различных зонах стальных отливок. Рисунок 6, *a* иллюстрирует ориентированное расположение дендритов в поверхностной зоне отливки. Неупорядоченное расположение дендритов в ее центральной зоне приведено на рисунке 6, *б*. Рисунок 6, *a, б* показывают исходное – дендритное строение зон отливки до образования границ зерен аустенита.

Пластическая деформация стали под действием релаксирующих напряжений приводит к фрагментации аустенита на зерна. Размер, количество и морфология зерен зависят от уровня и распределения напряжений по объему отливки, а также от реологических свойств аустенита. Один из вариантов связи ориентированных и равноосных зерен аустенита с его дендритной структурой показан на рисунке 6, *в, г*. В этом случае ориентация границ зерен совпадает с ориентацией мест соприкосновения радиально направленных дендритов. При этом границы зерен, как правило, проходят не по ликвационным участкам этих мест, а рядом с ними (рис. 2, *в*; 6, *в*). Так как градиент напряжений по сечению отливки определяет направление формирования границ аустенита, то, очевидно, их трансдендритное образование будет происходить до тех пор, пока уровень напряжений будет достаточен, а ориентация дендритов благоприятна для осуществления пластической деформации аустенита в радиальном направлении отливки. В этом процессе большую роль играет химический состав аустенита, который определяет его свойства и сопротивление пластической деформации. Уменьшение напряжений и изменение ориентации дендритов приводят к изменению условий скольжения дислокаций и затруднению дальнейшего трансдендритного образования межкристаллитных границ аустенита, упрочняющегося к центру отливки вследствие осевой ликвации примесных и легирующих элементов. Неметаллические включения и несплошности в стали также являются препятствиями на пути движения дислокаций. Наступает затухание процесса фрагментации дендритной структуры в отливке, проявляющееся в замедлении и ограничении распространения пластической деформации в местах сопряжения разориентированных дендритов аустенита. Так формируется зона равноосных зерен в отливке (рис. 6, *г*).

Высокий начальный уровень напряжений, особенности строения дендритов  $\delta$ -феррита и связанное с ним рассредоточение ликватов в приповерхностной зоне отливки из стали с 0,25 % С (рис. 2, *a*), по-видимому, являются причиной того, что в ней отсутствует зона мелких равноосных зерен (рис. 1, *a*).

На рисунке 6, *д* представлена гипотетическая ситуация, когда в силу направленного распределения напряжений, например, регулированием температуры по объему отливки или за счет ее «мягкого» обжатия границы зерен образуются вокруг практически каждой ветви дендритов. Будет

происходить значительное измельчение зерна в стали. Химический состав образующегося аустенита в осевых и междендритных участках может повлиять на образование границ зерен так, как, например, показано на рисунке б, е. Из этого рисунка видно, что границы ориентированных зерен формируются по осевым участкам дендритов.

Реализация описанных выше или других возможных вариантов связи дендритной и зеренной структур отливок будет приводить к формированию характерного для них уровня механических свойств. Это является главным в осуществлении идеи направленного управления формированием структуры и свойств стальных отливок. В равной степени это касается и стальных слитков, а также производства любых других литых металлических изделий и заготовок.

### **ВЫВОДЫ**

1. Формирование структурных зон стальных отливок следует разграничивать на этапы кристаллизации расплавов железа с образованием монокристаллического строения твердых растворов  $\delta$ - или  $\gamma$ -Fe и его разрушения путем пластической деформации под действием литейных напряжений с формированием поликристаллической (зеренной) структуры стали.

2. Образование зеренного строения структурных зон стальных отливок и их соотношение зависит от кристаллохимической и реологической гетерогенности первичных твердых растворов железа, уровня и характера распределения литейных напряжений.

3. Процессы пластической деформации и разрушения первичного литого строения твердых растворов железа по своей физической сути подобны аналогичным явлениям в других материалах. Поэтому образование зеренного строения литой стали следует рассматривать с позиций механики разрушения материалов на их атомно-кристаллическом уровне.

4. Строение границ зерен  $\delta$ -феррита или аустенита в литых сталях, являющееся следствием их высокотемпературной пластической деформации, влияет на морфологию образующихся от них структур при фазовых превращениях.

*Автор признателен А. А. Кононенко за обсуждение работы, критические замечания и полезные рекомендации.*

### **Литература**

1. Чернов Д. К. Избранные труды по металлургии и металлостроению / Д. К. Чернов. – М. : Наука, 1983. – 447 с.
2. Стальной слиток. В 2 т. Т. 1. Управление кристаллической структурой / под ред. В. И. Тимошпольского и Ю. А. Самойловича. – Минск : «Беларуская навука», 2000. – 583 с.
3. Pieger R. Образование горячих трещин при непрерывной разливке / R. Pieger, C. Bernhard, C. Chimani // Новости черной металлургии за рубежом : ОАО «Черметинформация». – 2008. – № 3. – С. 32–36.
4. Dirpenaag R. Поверхностные трещины на непрерывнолитой

заготовке – роль аномально крупных зерен первичного аустенита / R. Dirpenaar, S.-C. Moon, E. Szekeres // *Новости черной металлургии за рубежом* : ОАО «Черметинформация». – 2008. – № 6. – С. 32–36.

5. Bode O. Влияние параметров разливки на объем пор и осевую ликвацию в непрерывнолитых блюмах из стали 100Cr6 / O. Bode, K. Schwerdtfeger, H. G. Geck, F. Hofer // *Новости черной металлургии за рубежом* : ОАО «Черметинформация». – 2009. – № 2. – С. 44–48.

6. LONG M. Упрощенная модель для расчета скорости роста дендритов в процессе непрерывной разливки стали / M. LONG, L. ZHANG, F. LU // *Новости черной металлургии за рубежом* : ОАО «Черметинформация». – 2011. – № 3. – С. 36–38.

7. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок / Г. Ф. Баландин. – М. : Машиностроение, 1965. – 255 с.

8. Оно А. Затвердевание металлов / А. Оно. – М. : Металлургия, 1980. – 152 с.

9. Задиранов А. Н. Теоретические основы кристаллизации металлов и сплавов [Электронный ресурс] / А. Н. Задиранов, А. М. Кац. – Режим доступа: <http://books.google.com.ua>. – 24.01.2014 г.

10. Формирование структурных зон слитка [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [http://steelcast.ru/ingot\\_structure](http://steelcast.ru/ingot_structure). – 24.01.2014 г.

11. Хворинов Н. И. Кристаллизация и неоднородность стали / Н. И. Хворинов. – М. : Машгиз, 1958. – 392 с.

12. Мовчан Б. А. Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах / Б. А. Мовчан. – К. : Техніка, 1970. – 212 с.

13. Кристаллизация и первичная структура конструкционных сталей / А. И. Яценко и др. – Днепропетровск : Журфонд, 2010. – 226 с.

14. Борисенко А. Ю. Микроструктурные исследования формирования первичного зерна аустенита после кристаллизации углеродистых сталей с 0,5–0,7% С / А. Ю. Борисенко, А. А. Кононенко, А. И. Бабаченко, Л. Д. Науменко // *Доповіди НАН України*. – 2010. – № 9. – С. 70–77.

15. Лучкин В. С. Исследования структуры жидкой стали закалочно-микроструктурным методом / В. С. Лучкин, В. Ф. Поляков, С. И. Семькин, А. Ю. Борисенко, Л. Г. Тубольцев // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2011. – Вып. 24. – С. 145–156.

16. Кононенко А. А. Исследование влияния горячей пластической деформации и термической обработки на структуру и свойства литой колесной стали / А. А. Кононенко, А. И. Бабаченко, А. Ю. Борисенко и др. // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов*, Вып. 64 – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – С. 107–117.

17. Бабаченко А. И. Влияние горячей пластической деформации и термической обработки на структуру и механические свойства сталей для железнодорожных колес / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, А. Ю. Борисенко и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2012. – Вып. 25. – С. 177–186.

18. Производство стальных отливок / Козлов Л.Я., Колокольцев В.М., Вдовин К.Н. и др. / Под ред. Л.Я. Козлова. – М. : МИСИС, 2003. – 352 с.

19. Белоусов В. В. Структурная геология / В. В. Белоусов. – М. : МГУ, 1971. – 277 с.
20. Рац М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / М. В. Рац, С. Н. Чернышев. – М. : Недра, 1970. – 164 с.
21. Финкель В. М. Физика разрушения / В. М. Финкель. – М. : Metallургия, 1970. – 376 с.
22. Панин В. Е. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В. Е. Панин, Гриняев Ю. В., Данилов В. И. и др. – Новосибирск: Наука, 1990. – 255 с.
23. Котречко С.А. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков. – К. : Наукова думка, 2008. – 295 с.

**УДК 669.017:669.14:621.74:549**

**Формирование структурных зон в стальных отливках / А. Ю. Борисенко // Металознавство та термічна обробка металів: науков. та інформ. журнал / Дн-вськ : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 2. – С. ....-.... – Рис. 6. – Бібліограф.: (23 назв).**

Изучена связь структурных зон стальных отливок с их дендритным и зерненным строением. Показано, что направление расположения дендритов, возникающее при кристаллизации, определяет направление образования границ зерен в литой стали. Морфология, размер и особенности расположения зерен по сечению отливок зависят от кристаллохимической и реологической гетерогенности  $\delta$ -феррита или аустенита, уровня и характера распределения литейных напряжений.

Вивчено зв'язок структурних зон сталевих виливків з їх дендритною та зеренною будовою. Показано, що напрямок розташування дендритів, який виникає при кристалізації, визначає напрямок утворення границь зерен у литій сталі. Морфологія, розмір і особливості розташування зерен по перерізу виливків залежать від кристалохімічної та реологічної гетерогенності  $\delta$ -фериту або аустеніту, рівня і характеру розподілу ливарних напружень.

The connection between structural zones of steel castings and their dendrite and grain structure is studied. It was demonstrated that the direction of dendrites, being the result of crystallization, determines the direction of grain boundaries formation in cast steel. Grain morphology, size and peculiarities of their location along casting sections depend on crystal-chemical and rheological heterogeneity of ferrite or austenite, level and character of cast stress distribution.