

УДК 669-412.54-162.001.5

В.М. Сенопальников, В.Л. Сивков

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ В СЛИТКАХ СПОКОЙНОЙ СТАЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

На основании литературных данных и собственных исследований предложен механизм связывающий формирование зон «замороженных» и столбчатых кристаллов с конвективным движением затвердевающего расплава.

Ключевые слова: стальной слиток, конвекция, зона «замороженных» кристаллов, столбчатые кристаллы.

Известно, что в расплаве, залитом в изложницу, разность плотностей между охлажденным слоем у её стенки и горячим объёмом в центральной части приводит к развитию естественной конвекции. Вдоль поверхности охлаждения возникает нисходящий поток, а в осевой зоне слитка – обратный восходящий. Интенсивность конвекции зависит от разности температур поверхности охлаждения и расплава, а также вязкости последнего. Экспериментально установлено [1], что скорость движения расплава в нисходящем потоке по мере затвердевания слитка сначала довольно быстро снижается до определенного уровня (практически до нуля), далее несколько возрастает и в дальнейшем остаётся примерно на постоянном уровне (рис. 1).

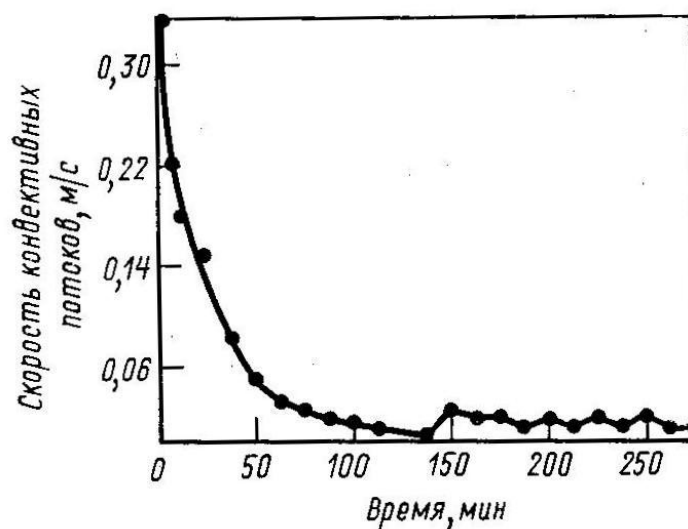


Рис. 1. Изменение скорости конвективных потоков в 40-тонном слитке в зависимости от продолжительности кристаллизации (через 50 мин после окончания заливки – 0,03 м/с; через 130 мин равна нулю)

В период заливки изложницы наружный слой расплава переохлаждается на глубину, определяемую температурой изложницы и интенсивностью движения жидкого металла. Практически это переохлаждение ($\Delta T_{\text{п}}$) всегда имеет величину, достаточную для зарождения на активных примесях на поверхности охлаждения и в прилежащем к ней объеме жидкой фазы изолированных кристаллов ($\Delta T_{\text{з.кр}}$):

$$\Delta T_{\text{п}} > \Delta T_{\text{з.кр}} \quad (1)$$

Поскольку турбулентные конвективные потоки расплава уносят большее количество этих кристаллов из зоны переохлаждения, то фиксируются и растут в основном только те частицы твердой фазы, которые зародились на активных примесях самой поверхности формы. Их смыванию препятствует, в том числе, и металлостатическое давление.

Дальнейшее формирование структуры слитка возможно по нескольким вариантам.

Вариант 1. Расплав в изложницу залит с перегревом, достаточным для образования вдоль поверхности охлаждения нисходящего турбулентного конвективного потока. При этом в пристенном ламинарном подслое жидкости, на который приходится практически весь перепад температуры, в течение некоторого времени выполняется условие (1), и происходит зарождение изолированных кристаллов на примесях. Вследствие исчезновения объёма на поверхности раздела твердой и жидкой фаз, возникают перемещения расплава, транспортирующие эти изолированные кристаллы из переохлажденного слоя жидкости к зафиксированной на поверхности изложницы корке затвердевшего металла.

Сила ($F_{\text{ус.к}}$), действующая на изолированные кристаллы со стороны жидкости, перемещающейся вследствие усадки, определяется как [2]:

$$F_{\text{ус.к}} = - \int_0^V \text{grad } P_{\text{ус.к}} dV_{\text{к}};$$

где $\text{grad } P_{\text{ус.к}} = \gamma v_x dv_x/dx$ – градиент давления в расплаве, обеспечивающий перемещение жидкости к фронту затвердевания вследствие изменения объёма при фазовом переходе; γ – плотность жидкости; v_x – скорость усадочных перемещений жидкости к фронту затвердевания; $V_{\text{к}}$ – объём кристалла.

Формируется слой мелкокристаллической структуры (зона «замороженных кристаллов»), который снижает интенсивность теплоотвода от расплава и переохлаждение жидкости перед фронтом твердой фазы. Размеры кристаллов в этой зоне соизмеримы с толщиной ламинарного подслоя нисходящего потока. Турбулентное конвективное движение расплава в период формирования корковой зоны слитка, поддерживает значительный температурный градиент на границе раздела фаз и ограничивает величину и глубину проникновения термического переохлаждения в пристенном слое расплава. Искусственное торможение конвекции, например с помощью вставленных в изложницу горизонтально кварцевых трубок, вызывает увеличение слоя мелкокристаллической структуры в 3-7 раз [1].

Вследствие нарастания теплового сопротивления затвердевшей корки, выделения теплоты кристаллизации и подвода тепла из центральной зоны слитка турбулентным потоком, величина переохлаждения $\Delta T_{\text{п}}$ становится недостаточной для зарождения изолированных кристаллов, но достаточной для роста их осей ($\Delta T_{\text{р.к}}$):

$$\Delta T_{\text{р.к}} < \Delta T_{\text{п}} < \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (2)$$

В этих условиях начинается преимущественный рост осей кристаллов «замороженного» слоя в сторону, обратную направлению градиента температуры в слитке, так как рост параллельно поверхности охлаждения невозможен из-за наличия соседних дендритов. Формируется зона столбчатых кристаллов.

Рост кристаллов сопровождается образованием на их поверхности слоя, обогащенного ликвирующими примесями. Выделению ликватов в жидкую фазу в процессе формирования столбчатой структуры препятствует разрежение, возникающее в межосных пространствах вследствие усадки. В результате этого химический состав транскристаллитной зоны слитков спокойной стали соответствует ковшевой пробе (в кипящей стали интенсивное газовыделение способствует выносу ликватов в жидкую фазу и обеднению зоны столбчатых кристаллов углеродом и примесями [3]).

Конвективная диффузия, обеспечиваемая турбулентным нисходящим вдоль фронта твердой фазы потоком, уменьшает концентрацию примесей перед обращенными к оси слитка вершинами осей кристаллов и стимулирует их рост.

Если при затвердевании технически чистых металлов малая концентрация примесей в расплаве не препятствует росту столбчатых кристаллов даже при незначительной интенсивности конвекции в малых объёмах, то в реальных сплавах снижение концентрации примесей перед межфазной поверхностью достигается только в условиях турбулентного конвективного потока.

Повышенной длительностью интенсивной естественной конвекции жидкого металла можно объяснить факты увеличения протяженности столбчатой структуры при повышении перегрева стали, разливаемой в изложницы [1], а также при возрастании массы слитка [4]. Данный вариант образования структуры – переход от замороженного слоя к столбчатым кристаллам, встречается наиболее часто при производстве слитков и отливок.

Прекращение роста столбчатых кристаллов происходит вследствие затухания конвекции. При переходе от турбулентного движения к ламинарному резко уменьшается коэффициент диффузии примесей из ликвационного слоя в расплав центрального объёма слитка. В результате температура ликвидуса сплава в этом слое и соответственно переохлаждение в нём снижаются – по терминологии предложенной А. Оно возникает концентрационная депрессия переохлаждения. Направленный рост дендритов останавливается и за ликвационным слоем, в переохлаждённом расплаве зарождаются по гетерогенному механизму изолированные кристаллы.

Изложенный подход к формированию поверхностных слоёв слитка подтверждается результатами известного эксперимента с установленными в изложницу пробками из кварцевого стекла, имеющими отверстия для прохождения расплава и представленными на рис. 2 [5].

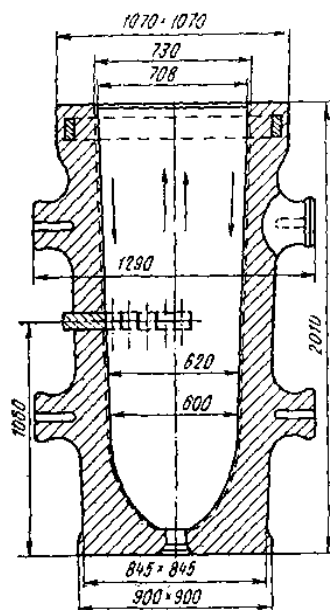


Рис. 2. Схема установки в изложницу кварцевой секционной пробы, состоящей из пяти пробок

На рис. 3 приведён авторский вариант схемы структуры стали на осевом темплете слитка вне и внутри пробок [6]. Было установлено, что структура внутри пробок имеет существенные отличия – со стороны изложницы во всех секциях имеет место зона разноориентированной (глобулярной) структуры, а с противоположной – зона столбчатых кристаллов.

С изложенных позиций такое чередование структурных зон может быть объяснено следующим образом. В примыкающей к изложнице зоне пробки, вследствие отсутствия конвекции, создаётся застойная область и зарождающиеся в переохлаждённом слое изолированные кристал-

лы не уносятся с нисходящим потоком. Наличие в корковом слое более крупных, чем вне пробницы кристаллов («глобулярных дендритов, характерных для осевой зоны слитка» [5, 6]) указывает на их более длительное пребывание в окружении жидкой фазы. Это можно объяснить большей шириной переохлаждённой области зарождения кристаллов и соответственно более длительным процессом их переноса к поверхности раздела фаз за счёт усадочных перемещений расплава.

Продвижение фронта твёрдой фазы образованной этими кристаллами продолжается до границы отверстия в пробнице. Здесь величина переохлаждения расплава резко уменьшается вследствие наличия конвективного потока. Условия затвердевания внутри пробницы и вне её выравниваются – идёт формирование направленной структуры (в пробнице рост столбчатых кристаллов ограничивается перегородкой).

За перегородкой в застойной области второй секции пробницы теплоотвод через твёрдую фазу и отсутствие подвода тепла турбулентным потоком расплава создают условия для объёмного зарождения кристаллов. Переход к столбчатым кристаллам во второй секции пробницы, как и в первой, начинается при появлении перед фронтом затвердевания конвективного движения расплава через отверстие.

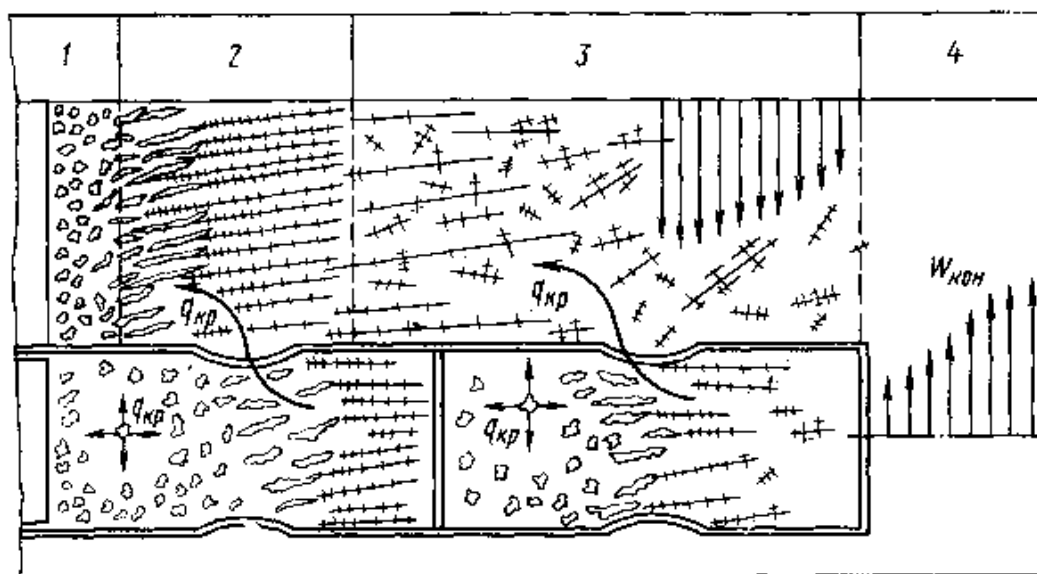


Рис. 3. Схема структуры стали на осевом темплате слитка вне и внутри пробниц:

1 – 4 – структурные зоны основного металла слитка: корковая, столбчатых кристаллов, переходная смешанных кристаллов, и глобулярных дендритов

Вариант 2. Расплав залив в изложницу или в водоохлаждаемый кристаллизатор со значительным перегревом. Вдоль слоя зародившихся на поверхности охлаждения дендритов имеет место интенсивный турбулентный нисходящий конвективный поток. Температурный градиент очень велик, а толщина ламинарного подслоя крайне мала. В этих условиях выполняется условие (2) – величина переохлаждения недостаточна для зарождения кристаллов. Столбчатая структура формируется путём роста осей кристаллов, зародившихся непосредственно на поверхности изложницы (отсутствие «замороженного» слоя). Такой механизм реализуется в слитках ВДП, где имеет место интенсивное электромагнитное перемешивание жидкости [7], а также иногда при непрерывной разливке стали [8].

Поступление более горячего металла сверху и усиленное обмывания верхней поверхности вершин столбчатых кристаллов приводит к их отклонению навстречу нисходящему потоку. Аналогичный эффект имеет место при электромагнитном перемешивании стали в

кристаллизаторе УНРС (столбчатые кристаллы наклонены навстречу потоку в горизонтальной плоскости) [9].

Рост столбчатых кристаллов от поверхности охлаждения возможен также, когда условие (2) достигается за счет ограниченного теплоотвода от расплава (например в предварительно нагретой футерованной прибыльной надставке при разливке стали в изложницы [8]).

Вариант 3. Расплав в изложницу залит с незначительным перегревом. После образования мелкокристаллического коркового слоя конвективное движение расплава вдоль фронта затвердевания переходит в ламинарный режим. Слой переохлажденного расплава имеет значительную толщину. В нем продолжается зарождение изолированных кристаллов – выполняется условие (1). Дальнейшее продвижение фронта твердой фазы происходит только за счет присоединения этих кристаллов – формируется разноориентированная структура. Интенсивность усадочных перемещений жидкости по сравнению с условиями формирования коркового слоя постепенно снижается. Это увеличивает продолжительность пребывания изолированных кристаллов в объеме переохлажденного расплава до присоединения к фронту твердой фазы и соответственно их размеры.

Такая структура (отсутствие зоны столбчатых кристаллов) встречается в крупных слитках, отлитых в вакуумных камерах [10–12].

Выводы

Предложенная описательная модель позволяет связать образование поверхностных структурных зон слитка спокойной стали с интенсивностью конвективного движения расплава в начальный период его формирования. Причиной перехода от разноориентированной мелкокристаллической структуры к столбчатой является уменьшение переохлаждения перед фронтом твердой фазы за счет подвода тепла к нему турбулентным конвективным потоком. Прекращение развития столбчатой структуры происходит из-за снижения интенсивности естественной конвекции, следствием чего является уменьшение коэффициента диффузии примесей из ликвационного слоя перед вершинами кристаллов в центральные объемы расплава и развития концентрационной депрессии переохлаждения в этом слое.

Библиографический список

1. **Ефимов, В.А.** Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. **Левич, В.Г.** Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 669 с.
3. **Гуляев, Б.Б.** Затвердевание и неоднородность стали / Б.Б. Гуляев. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 228 с.
4. Качество слитка спокойной стали / М.И. Колосов [и др.]. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
5. Исследование процессов структурообразования и ликвации примесей в слитках спокойной стали / В.Б. Вихляев [и др.] // Проблемы стального слитка: тр. V конференции по слитку. – М.: Металлургия, 1974. С. 81–86.
6. **Вихляев, В.Б.** К вопросу о структуре двухфазной зоны и механизме массопереноса в ней / В.Б. Вихляев, В.А. Ефимов, Н.Я. Ищук // Проблемы стального слитка. 1976. №6. С. 122–129.
7. **Сергеев, А.Б.** Вакуумный дуговой переплав конструкционной стали / А.Б. Сергеев, Ф.И. Швед, Н.А. Тулин. – М.: Металлургия, 1974. – 192 с.
8. **Пронов, А.П.** Кристаллизация стального слитка / А.П. Пронов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 150 с.
9. Непрерывное литье во вращающемся магнитном поле / А.Д. Акименко [и др.]. – М.: Металлургия, 1971. – 177 с.

10. **Микульчик, А.В.** Химическая неоднородность структуры крупных кузнечных слитков / А.В. Микульчик // Проблемы стального слитка: тр. V конференции по слитку. – М.: Металлургия, 1974. С. 543–545.
11. **Соколов, В.Е.** Исследование 28,5-т слитка, отлитого с углеродным раскислением в вакууме / В.Е. Соколов., А.В. Микульчик, В.Е. Гринь // Усовершенствование процессов разливки стали: тр. VIII научно-технич. конф. – М.: Металлургия, 1981. С. 74–75.
12. **Сенопальников, В.М.** Управление процессами затвердевания слитка спокойной стали / В.М. Сенопальников, Г.А. Лубенец, В.Л. Сивков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. – 128 с.

*Дата поступления
в редакцию 03.12.2013*

V.M. Senopalnikov, V.L. Sivkov

THE FORMATION OF THE SURFACE STRUCTURE OF INGOTS OF QUIET STEEL

Nizhny Novgorod state technical university. R.E. Alexeev

Purpose: Explanation of the causes of the structural heterogeneity of the ingot.

Method: Analysis of the literature data and the results of our work on the structure of the surface of structural zones ingot quiet steel.

Results of work and their field of application: the Proposed descriptive model allows one to associate the formation of the surface structural zones ingot calm steel intensity of convective motion of the melt in the initial period of its formation.

Conclusions: the Reason for the switch from fine-crystalline structure of the column is to reduce hypothermia in front of the solid phase by supplying heat to him turbulent convective flow. Termination development columnar structures is due to decreasing of intensity of natural convection, resulting in a decrease of the coefficient of diffusion of impurities from enriched ликватами layer before peaks crystals in Central volumes of melt and development of the concentration of depression hypothermia in this layer.

Key words: steel ingot, convection zone of «frozen» crystals, columnar crystals.