

УДК 669.017+536.4

*С. М. КАБИШОВ, И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ*

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ СТОЛБЧАТЫХ ДЕНДРИТОВ  
В НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
e-mail: boxsmk@gmail.com*

Выполнена теоретическая оценка условий формирования столбчатых дендритов в непрерывнолитой заготовке. Установлена взаимосвязь между формой дендрита и параметрами внешнего охлаждения и интенсивностью циркуляции расплава вблизи фронта кристаллизации. Определены наиболее эффективные методы воздействия, обеспечивающие улучшение макроструктуры заготовки.

*Ключевые слова:* фронт кристаллизации, расплав, двухфазная зона, кластер, дендрит, структура, интенсивность теплообмена.

*S. M. KABISHOV, I. A. TRUSOVA, P. Je. RATNIKOV*

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS INFLUENCE ON THE PROCESS OF FORMING  
OF A ZONE OF COLUMNAR DENDRITES IN CONTINUOUS CASTING**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,  
e-mail: boxsmk@gmail.com*

A theoretical assessment of the conditions of formation of columnar dendrites in continuous casting is made. A relationship between a shape of dendrite and parameters of external cooling and intensity of circulation of melt near the crystallization front is established. The most effective methods of influence that improve the macrostructure of the workpiece are defined.

*Keywords:* crystallization front, melt, two-phase zone, cluster, dendrite structure, the intensity of the cooling.

**Введение.** Согласно современным представлениям, процесс зарождения и последующего роста отдельно взятого кристалла в металлической жидкости можно условно разделить на несколько стадий:

1) охлаждение поверхности фронта кристаллизации (дендрита) и окружающего расплава до температуры, которая ниже температуры ликвидуса  $T_L$  на некоторую величину (температуру переохлаждения  $\Delta T$ ) и зависит от фактического состава расплава в данной области и условий охлаждения;

2) присоединение элементарного объема (кластера(ов) или плоского зародыша) жидкой фазы к поверхности фронта или дендрита. Присоединяемые кластеры уже имеет структуру, подобную структуре твердой фазы. Они формируются и периодически распадаются в перегретом расплаве, но при охлаждении ниже равновесной линии ликвидуса приобретают большую стабильность, оставаясь, по сути, частью жидкости;

3) переход данного микрообъема в твердую фазу с выделением скрытой теплоты кристаллизации. При кристаллизации большинства металлов данная стадия сопровождается уменьшением объема кластера, перешедшего в твердую фазу. Как следствие это вызывает возмущения в расплаве вблизи поверхности фронта кристаллизации, что влияет как на условия теплообмена между жидкой и твердой фазами, так и на процессы распределения примесей в данной области;

© Кабишов С. М., Трусова И. А., Ратников П. Э., 2015

4) частичный отвод выделившейся теплоты через ствол дендрита в твердую фазу и одновременно некоторый разогрев собственно дендрита и расплава вблизи его поверхности (при условии, когда скорость выделения скрытой теплоты кристаллизации больше, чем скорость теплоотвода через твердую фазу).

При дальнейшем охлаждении слитка цикл повторяется (отметим, что получение материалов с аморфной структурой в рамках данной работы рассматриваться не будет).

Анализ приведенных данных показывает, что температура вблизи поверхности формирующегося дендрита изменяется циклически. Продолжительность отдельных циклов и величина переохлаждения будут зависеть от градиентов температуры в твердой и жидкой фазах, концентрации и свойств нерастворимых включений в расплаве, наличия ликватов и кластеров вблизи фронта кристаллизации и т. д. В реальных условиях оценить продолжительность отдельного цикла и выделить его из общего массива актов кристаллизации достаточно сложно. Тем не менее исследования [1–3 и др.] показали, что процесс кристаллизации сопровождается акустическими и иными эффектами, имеющими циклический характер.

При математическом моделировании реальных промышленных макрообъектов учет процессов, продолжительность которых составляет тысячные доли секунды и менее, нецелесообразно. Анализ условий, влияющих на формирование микроструктуры металла, представляет определенный научный и практический интерес. Прежде всего, речь идет о совершенствовании применяемых методов динамического воздействия на слиток в условиях машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), а также о разработке новых, эффективных способов, обеспечивающих получение высококачественной продукции.

Чтобы оценить влияние различных факторов на процесс формирования структуры непрерывнолитой заготовки в данной работе предлагается выполнить анализ балансового уравнения растущего на фронте кристаллизации дендрита (кристаллита) при условии его сохранения без подплавления и разрушения за время одного элементарного акта (присоединение и переход в твердую фазу слоя расплава, имеющего толщину, равную диаметру кластера, т. е. порядка 10 нм) кристаллизации  $\tau_{кр}$ :

$$\rho_S L \frac{1}{\tau_{кр}} \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{кр}} V d\tau + \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{кр} + \tau_{охл}} q_l F_{L-S} d\tau = \rho_S c_S \Delta \bar{T}_d \left[ V_0 + \frac{1}{\tau_{кр}} \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{кр}} V d\tau \right] + \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{кр} + \tau_{охл}} q_S F_S d\tau, \quad (1)$$

где  $\rho_S$ ,  $c_S$  – плотность и теплоемкость твердой фазы;  $V_0$  – начальный объем твердой фазы;  $L$  – скрытая теплота кристаллизации;  $q_S$  – плотность теплового потока, отводимого от охлаждаемой поверхности заготовки;  $q_l$  – плотность теплового потока от жидкой фазы к поверхности дендрита и фронта кристаллизации в пределах выделенного объема;  $\Delta \bar{T}_d$  – изменение средней температуры твердой фазы (корочки) за время  $\tau_{кр} + \tau_{охл}$ .

В момент перехода от гладкого фронта к ячеистой структуре в уравнении (1) будем иметь  $V_0 = \delta_0 F_S$ . Здесь  $\delta_0$  – толщина слоя разориентированных дендритов, который образовался до момента, когда соотношение теплового потока со стороны жидкой фазы и потока, отводимого от поверхности заготовки, перестало обеспечивать дальнейший рост слоя с гладким фронтом. Будем считать, что время перехода кластера из жидкого в кристаллическое состояние существенно не изменится при удалении от поверхности слитка, т. е.  $\tau_{кр} \sim 10^{-6}$  с [4, 5]. Косвенно это предположение подтверждает линейный рост твердой корочки заготовки при затвердевании в условиях МНЛЗ, что говорит о постоянстве скорости кристаллизации на макроуровне. Так как на микроуровне процесс кристаллизации носит циклический характер, при интегрировании тепловых потоков и изменений средней температуры по сечению твердой корочки необходимо учесть дополни-

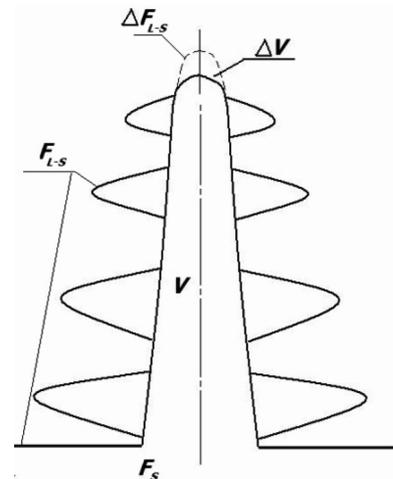


Рис. 1. Расчетная схема растущего дендрита

тельно время  $\tau_{\text{охл}}$  для переохлаждения расплава вблизи фронта кристаллизации до температуры  $T = T_L - \Delta T$ .

Основные геометрические параметры процесса отражены на рис. 1.

Выразив плотности тепловых потоков через соответствующие градиенты температуры, получим

$$\begin{aligned} & \rho_S L \frac{1}{i\tau_{\text{кр}}} \int_{\tau_0}^{\tau_0+i\tau_{\text{кр}}} V d\tau - \lambda_L \int_{\tau_0}^{\tau_0+i(\tau_{\text{кр}}+\tau_{\text{охл}})} (F_S + n(F_{Dl} - F_{DS}) \text{grad } T_{liq}) d\tau = \\ & = \rho_S c_S \left[ \delta_0 F_S + \frac{1}{i\tau_{\text{кр}}} \int_{\tau_0}^{\tau_0+i\tau_{\text{кр}}} V d\tau \right] \left[ \overline{T_{sol,0}} - \frac{1}{i(\tau_{\text{кр}} + \tau_{\text{охл}})} \int_{\tau_0}^{\tau_0+i(\tau_{\text{кр}}+\tau_{\text{охл}})} T_{sol} d\tau \right] - \\ & \quad F_S \lambda_S \int_{\tau_0}^{\tau_0+i(\tau_{\text{кр}}+\tau_{\text{охл}})} \text{grad } T_{sol} d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $i$  – количество элементарных актов кристаллизации;  $F_{Dl}$  – площадь поверхности одного дендрита,  $F_{DS}$  – площадь основания дендрита;  $\overline{\Delta T_{sol}} = \overline{T_{sol,0}} - \frac{1}{i(\tau_{\text{кр}} + \tau_{\text{охл}})} \int_{\tau_0}^{\tau_0+\tau_{\text{кр}}+\tau_{\text{охл}}} T_{sol} d\tau$  – изменение среднеинтегральной температуры твердой фазы за время  $i(\tau_{\text{кр}} + \tau_{\text{охл}})$ .

Когда толщина твердой корочки достигает критической величины, приводящей к изменению соотношения тепловых потоков от жидкого ядра к фронту кристаллизации и от поверхности заготовки к стенкам кристаллизатора, стадия послойного наращивания твердой фазы заканчивается. Образование термического сопротивления в виде наружной корочки, неравномерность поверхностного охлаждения, обусловленная наличием микро- и макронеровностей на поверхности заготовки, сложный характер течения расплава вдоль фронта кристаллизации, вариации состава и размеров кластеров в жидкости и другие факторы приводят к возникновению на границе раздела фаз участков с различной величиной интенсивности теплоотвода. Это способствует очаговому росту твердой фазы на одних участках и подавлению либо замедлению ее роста на соседних участках.

Следует учитывать, что на стадии роста столбчатых дендритов существует связь между объемом кристаллизующегося металла и некоторыми параметрами растущего дендрита. В частности, количество расплава, переходящего за время  $\tau_{\text{кр}}$  в твердую фазу, является функцией площади сечения основного ствола дендрита. Это объясняется тем, что основная доля выделяющейся скрытой теплоты кристаллизации отводится именно через ствол дендрита. Доля теплоты, поглощаемой расплавом, на наш взгляд, будет невелика, так как на момент кристаллизации значения температур жидкости в зоне контакта с твердой фазой и поверхности дендрита будут одинаковыми, а величина коэффициента теплопроводности твердой фазы несколько выше, чем значение аналогичной характеристики расплава. Выделение ликватов еще больше снижает способность расплава проводить тепло.

Что касается площади поверхности растущего дендрита, т. е. формы и степени развития ветвей второго и более высоких порядков, она будет зависеть от множества факторов и, прежде всего, от соотношения тепловых потоков со стороны жидкого ядра и интенсивности поверхностного охлаждения. Важную роль в формировании очертаний растущего кристаллита будет играть концентрация ликватов в жидкости, окружающей дендрит. Более высокое содержание растворимых примесей приведет к тому, что уменьшится вероятность возникновения кластеров, имеющих состав, обеспечивающий переход в твердую фазу при температуре в диапазоне между ликвидусом и солидусом разливаемого сплава. Также уменьшатся и их размеры. Как следствие ветви и растущая вершина ствола дендрита будут более тонкими. Следовательно, столбчатый дендрит будет иметь вытянутую форму, а расплав и металл, впоследствии затвердевший в междендритном пространстве, будут обогащены ликватами. Данная ситуация возможна при низкой интенсивности циркуляции расплава у фронта кристаллизации, высокой интенсивности охлаждения и значительных размерах двухфазной зоны, в пределах которой диффузия протекает в основном на молекулярном уровне.

Наоборот, высокая скорость диффузии ликватов из междендритного пространства в жидкое ядро будет способствовать притоку чистых по содержанию примесей порций расплава. В результате столбчатый дендрит будет иметь меньшую высоту, и качество структуры затвердевшего металла будет улучшаться.

Заметное влияние на форму и размеры дендритов оказывает концентрация нерастворимых в расплаве твердых включений, которые служат потенциальными центрами зарождения кластеров и зародышей твердой фазы. Например, в [6] отмечается, что присутствие в расплаве нитридов титана при затвердевании углеродистых сталей и сталей, легированных хромом и алюминием, подавляет транскристаллизацию.

Таким образом, при затвердевании сталей, имеющих широкий интервал кристаллизации, особую роль играют выбор рационального соотношения между интенсивностью охлаждения и подвода теплоты к фронту кристаллизации со стороны жидкой фазы, а также концентрация ликвирующих элементов и нерастворимых включений.

Для анализа влияния интенсивности охлаждения заготовки и теплоотдачи на границе раздела твердая фаза – расплав на форму столбчатых дендритов выполним некоторые замены и преобразования в уравнениях (1), (2).

Введем следующие обозначения:  $\psi = n\Delta V/V_0$  – относительный объем увеличения твердой фазы, где  $\Delta V$  – изменение объема дендрита за период времени  $i\tau_{кр}$ ;  $V_0 = \delta_0 F_S$  – начальный объем твердой фазы (корочки из разориентированных мелких дендритов) перед началом формирования ячеистого фронта кристаллизации,  $m^3$ ;  $n$  – количество дендритов на участке площадью  $F_S$ ;  $\beta_d = nF_{DS}(\tau)/F_S$  – относительная величина оснований дендритов на участке фронта площадью  $F_S$ ;  $k_f = nF_{DI}(\tau)/F_S$  – относительная площадь поверхности  $n$  дендритов, растущих на участке фронта площадью  $F_S$ ;  $I_S = q_S(\tau)(\tau_{кр} + \tau_{охл})/(\delta_0 \rho_S \Delta i_S)$  – отношение количества теплоты, отведенной от единицы поверхности заготовки за время  $\tau_{кр} + \tau_{охл}$ , к изменению теплосодержания наружной корочки из разориентированных дендритов толщиной  $\delta_0$  при изменении средней температуры на  $\Delta T_{sol}$ ;  $I_L = q_L(\tau)(\tau_{кр} + \tau_{охл})/(\delta_0 \rho_S \Delta i_S)$  – отношение количества теплоты, подведенной к единице поверхности фронта кристаллизации за время  $\tau_{кр} + \tau_{охл}$ , к изменению теплосодержания наружной корочки из разориентированных дендритов толщиной  $\delta_0$  при изменении средней температуры на  $\Delta T_{sol}$ ;  $\Lambda = L/\Delta i_S$  – отношение скрытой теплоты кристаллизации к изменению энтальпии твердой фазы.

Необходимо отметить, что после того, как основания дендритов закроют все свободное пространство гладкого фронта кристаллизации, величина  $\beta_d$  станет равна 1. Значения  $k_f$  на стадии формирования зоны столбчатых кристаллов могут быть на 1–2 порядка больше. Поэтому при дальнейшем рассмотрении балансового уравнения в безразмерном виде выполним замену этих величин на единый показатель, который назовем коэффициентом формы дендрита:

$$K_D = k_f - \beta_d.$$

Выполнив подстановку и выразив из балансового уравнения коэффициент  $K_D$ , получим

$$K_D = \frac{1 + I_S - \Psi(\Lambda - 1)}{I_L} - 1. \quad (3)$$

Формула (3) подтверждает высказанную ранее гипотезу, что повышение интенсивности теплообмена между расплавом и фронтом кристаллизации приводит к уменьшению наружной поверхности дендрита, т. е. отношение объема растущего дендрита к его внешней поверхности будет уменьшаться. Наоборот, рост интенсивности наружного охлаждения при сохранении условий теплообмена между жидкостью и твердой фазой будет способствовать развитию внешней поверхности дендрита.

Очевидно, что в случае, когда первое слагаемое в выражении (3)  $[1 + I_S - \Psi(\Lambda - 1)]/I_L = 2$ , то коэффициент формы (3)  $K_D$  будет равен 1, т. е. рост дендрита прекращается (фронт становится гладким). Если же первый член выражения (3) становится меньше 2, это свидетельствует о том, что высокая интенсивность циркуляции расплава у фронта кристаллизации приведет к оплавлению твердой фазы.

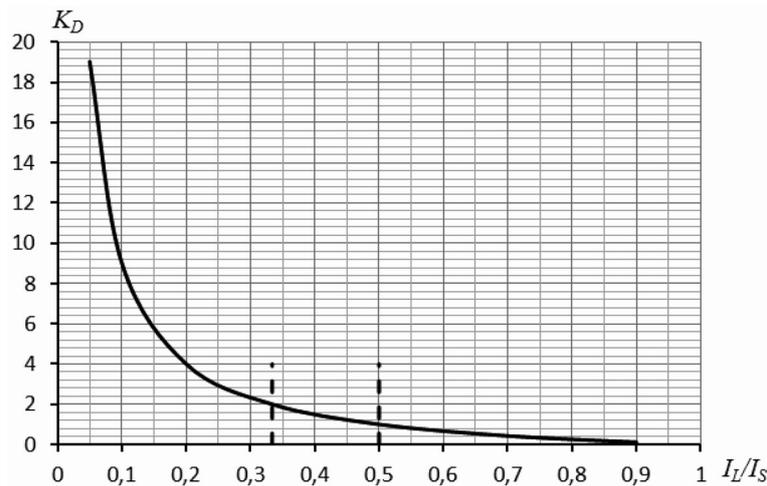


Рис. 2. Зависимость коэффициента формы дендрита  $K_D$  от соотношения интенсивностей теплообмена между жидким расплавом и фронтом кристаллизации и внешнего охлаждения заготовки  $I_L/I_S$

В выражении (3) значение интенсивности внешнего теплообмена  $I_S$  изменяется по мере передвижения заготовки по разливочной дуге МНЛЗ в зависимости от расхода воды и температуры поверхности металла. Цикличность процесса кристаллизации практически не будет оказывать какого-либо заметного влияния на данную величину. В отличие от  $I_S$  плотность теплового потока от жидкого ядра заготовки к фронту кристаллизации будет циклически изменяться вместе с температурой поверхности растущих дендритов. Однако частота этих колебаний довольно высока (до  $10^6$ – $10^7$  с<sup>-1</sup>). Поэтому в процессе расчетов будем рассматривать некую усредненную величину  $I_L$ , которую выразим как долю от интенсивности наружного охлаждения  $I_S$ .

Задаваясь теплофизическими характеристиками углеродистой стали вблизи температуры кристаллизации [7–9] ( $\lambda_S = 23$  Вт/(м·К);  $c_S = 870$  Дж/(кг·К);  $L = 272000$  Дж/кг;  $\rho_S = 7500$  кг/м<sup>3</sup>), а также условиями теплообмена, присущими первому участку зоны вторичного охлаждения МНЛЗ ( $\alpha = 800$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{\text{пов}} = 1000$  °С), получаем зависимость  $K_D = f(I_L/I_S)$  (рис. 2). Помимо указанных величин при расчетах принимались значения иных параметров, входящих в безразмерные критерии в уравнении (3):  $\delta_0 = 0,002$  м; радиус кластера  $R = 10^{-8}$  м;  $F_S = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $\tau_{\text{кр}} = 10^{-6}$  с;  $\tau_{\text{охл}} = 10^{-5}$  с.

Штриховыми линиями на рис. 2 выделена область, в пределах которой гладкий фронт кристаллизации переходит к ячеистой структуре. В случае, когда  $I_L/I_S < 0,5$ , происходит подплавление закристаллизовавшегося металла. Такая ситуация характерна для технологии непрерывной разливки стали, когда в кристаллизаторе либо под ним установлена катушка электромагнитного перемешивания, работа которой приводит к интенсивной циркуляции расплава в жидком ядре заготовки. Частичное расплавление затвердевшей корочки также может возникать при неправильной организации потоков расплава в кристаллизаторе (неудачная конструкция разливочного стакана, отклонение струи расплава от вертикальной оси кристаллизатора и др.).

При интенсивности теплообмена между жидким расплавом и поверхностью кристаллической фазы меньше  $0,334 I_S$  создаются условия для возникновения первичного ствола дендрита. Дальнейшее снижение интенсивности внутреннего теплообмена на фронте кристаллизации способствует активному росту ветвей второго и более высоких порядков.

**Заключение.** Как показывает анализ результатов, получение качественной макроструктуры литого металла возможно при согласованном управлении интенсивностью внешнего теплообмена и другими динамическими воздействиями. При этом особое внимание следует уделять реакции на внешние воздействия не жидкого ядра заготовки в целом, а расплава в междендритном пространстве и пограничном слое у границы двухфазной зоны.

При помощи управления тепловыми и гидродинамическими процессами возможно влиять на ширину и продолжительность этапа формирования столбчатой кристаллизации. Наиболее эффективными из известных способов управления являются системы электромагнитного пере-

мешивания и модифицирования расплавов путем ввода наноразмерных инокуляторов. Применение, например, нитридов титана, микролегирование сталей азотом, ввод порошков редкоземельных металлов в ядро слитка позволяют измельчить структуру. В зависимости (3) это можно учесть через критерий  $\Psi$ , где есть количественный параметр  $n$ . По сути, он является функцией концентрации твердых неметаллических включений, присутствующих в расплаве и способных выполнять роль зародышей твердой фазы.

Теоретический анализ условий формирования зоны столбчатых дендритов в непрерывнолитой заготовке, выполненный в данной статье, показал, что наиболее перспективными способами улучшения макроструктуры литого металла являются динамические методы воздействия на расплав в области двухфазной зоны, а также использование холодильников, обеспечивающих быстрое снятие теплоты перегрева расплава и создающих значительное количество дополнительных центров кристаллизации. При этом частоту динамических воздействий следует выбирать с учетом частоты циклических процессов, протекающих на фронте кристаллизации, а необходимую глубину проникновения внешнего воздействия оценивать, принимая во внимание толщину затвердевшей корочки и двухфазной зоны в области применения воздействия.

### Список использованной литературы

1. *Воронцов, В. Б.* Связь акустической эмиссии при фазовых переходах расплав – твердое тело со структурой расплава для металлических систем / В. Б. Воронцов, В. В. Катыльников // Сб. тр. Рос. конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов», Екатеринбург. – Екатеринбург, 2004. – Т. 4. – С. 12.
2. *Воронцов, В. Б.* Связь структуры сигналов акустической эмиссии при кристаллизации Al с механизмом формирования твердой фазы из расплава / В. Б. Воронцов, Д. В. Журавлев // Вестн. Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2012. – № 67. – С. 8–13.
3. *Ошурков, Н. В., Романенко В. Н.* Вопросы физики формообразования и фазовых превращений / Н. В. Ошурков. – Калинин, 1987. – 40 с.
4. *Филиппов, Е. С.* Строение, физика и химия металлургических расплавов / Е. С. Филиппов. – М.: Металлургия, 1995. – 304 с.
5. *Смирнов, А. Н.* Крупный слиток: [монография] / А. Н. Смирнов [и др.]. – Донецк: Вебер, 2009. – 279 с.
6. *Самойлович, Ю. А.* Сокращение зоны столбчатых кристаллов в стальном слитке путем микролегирования расплава / Ю. А. Самойлович [и др.] // Литье и металлургия. – 2007. – №3. – С. 42–49.
7. *Дюдкин, Д. А.* Производство стали. Т. 4. Непрерывная разливка металла / Д. А. Дюдкин, В.В. Кисиленко, А. Н. Смирнов. – М.: Теплотехник, 2009. – 528 с.
8. *Самойлович, Ю. А.* Формирование слитка / Ю. А. Самойлович. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.
9. *Самойлович, Ю. А.* Стальной слиток. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Ю. А. Самойлович [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2000. – 637 с.

Поступила в редакцию 15.06.2015