

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК НА РАДИАЛЬНЫХ МНЛЗ

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук,
И. А. ТРУСОВА, д-р техн. наук
Белорусский национальный технический университет
С. М. КАБИШОВ, канд. техн. наук
Министерство промышленности Республики Беларусь

В статье рассмотрены закономерности образования и развития зон столбчатой (дендритной) и глобулярной (объемной) кристаллизации при разливке непрерывнолитых заготовок на машинах непрерывного литья современной конструкции. Выполнен анализ влияния на протяженность жидкой лунки (металлургической длины) заготовки таких факторов, как скорость литья и химический состав стали. На основании расчетов определена оптимальная интенсивность охлаждения заготовок в зоне вторичного охлаждения с целью предотвращения дефектов.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, интенсивность охлаждения в зоне вторичного охлаждения, функционал, длина зон столбчатых и глобулярных кристаллов

REGULARITIES OF CRYSTALLIZATION OF CONTINUALLY CAST BILLETS ON RADIAL CCM

V. I. TIMOSHPOL'SKIJ, Dr. of Engineering Sciences,
I. A. TRUSOVA, Dr. of Engineering Sciences
Belarusian National Technical University
S. M. KABISHOV, Ph. D. in Technical Sciences
Ministry of Industry of the Republic of Belarus

The article examines the patterns of formation and development of zones of columnar (dendritic) and globular (volumetric) crystallization during casting of continuously cast billets on continuous casting machines of modern design. An analysis of the influence on the length of the liquid crater (metallurgical length) of the workpiece by factors such as casting speed and chemical composition of

steel was carried out. Based on calculations, the optimal cooling intensity of work pieces in the secondary cooling zone was determined in order to prevent defects.

Keywords: *continuously cast billet, cooling intensity in the secondary cooling zone, functionality, length of zones of columnar and globular crystals.*

В настоящее время требования к качеству непрерывнолитых заготовок постоянно ужесточаются, что приводит к необходимости управления процессом разливки на различных стадиях их формирования. При этом наряду с оценкой термонапряженного состояния заготовок необходимо рассматривать закономерности затвердевания металла в рамках теории глобулярной (объемной) кристаллизации. В частности, в работах [1–3] отмечается, что при преобладании столбчатых кристаллов вероятным становится возникновение таких дефектов как осевая ликвация, пористость и др.

При непрерывном литье процесс затвердевания слитка условно можно разделить на четыре стадии [1; 2]:

0 – формирование слитка в пределах кристаллизатора;

I – затвердевание слитка при наличии перегрева жидкой фазы с образованием зоны столбчатых кристаллов;

II – затвердевание переохлажденного расплава с образованием зоны глобулярных (равноосных) кристаллов;

III – охлаждение полностью остывшей заготовки (слитка).

Очевидно, что управление процессом кристаллизации представляется возможным осуществлять на *I* и *II* стадиях, поэтому целью расчетного анализа является определение основных показателей зоны вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ, в частности протяженности участков. Для каждого из участков необходимо определить рациональную интенсивность охлаждения, которая количественно оценивается величиной усредненного коэффициента теплоотдачи α_i , а технологически обеспечивается путем регулирования числа используемых водяных форсунок, способами их размещения и удельным расходом охлаждающей воды (в ЗВО).

В процессе выполнения расчетного анализа возможно оценить влияние ряда технологических факторов на процесс кристаллизации слитка:

– скорости разливки слитка $v_{л}$;

- поперечного сечения слитка;
 - химического состава стали, отраженных в наборе теплофизических характеристик (температуры ликвидуса и солидуса, коэффициенты массовой плотности, удельной теплоемкости, теплопроводности, скрытой теплоты плавления);
 - геометрических характеристик МНЛЗ (высота кристаллизатора, протяженность отдельных участков зоны вторичного охлаждения);
 - начального перегрева расплава, поступающего в кристаллизатор.
- При осуществлении расчетов можно использовать два принципиально отличных подхода.

Решение прямой задачи. В этом случае известны основные конструктивные и технологические параметры МНЛЗ и в ходе расчетов варьируются поддающиеся управлению показатели теплового режима, в частности начальный перегрев расплава и значения коэффициентов теплоотдачи α_i на отдельных участках зоны вторичного охлаждения. В результате расчетов определяются следующие показатели: длительность прохождения заготовки каждого из участков ЗВО и соответствующая протяженность этих участков ($L_1 = \Delta t_1 v_{пл}$, $L_2 = \Delta t_2 v_{пл}$ и т. д.), а также полная глубина жидкой фазы слитка, равная сумме:

$$L_{мет} = H_{кр} + L_1 + L_2.$$

Параметр $L_{мет}$ иногда называют «металлургической длиной» МНЛЗ. В заключение полученное расчетом значение $L_{мет}$ сопоставляют с конструктивными показателями МНЛЗ, в частности, с расстоянием от верхнего среза кристаллизатора до местоположения базовых тянущих (изгибающих) роликов МНЛЗ. Если оказывается, что расчетное значение $L_{мет}$ не согласуется с конструктивным параметром L_k (например, $L_{мет} \gg L_k$), то расчеты повторяются при варьировании коэффициентов теплоотдачи на участках ЗВО, вплоть до достижения необходимого соответствия значений $L_{мет}$ и L_k .

Решение обратной задачи. В этом случае формулируется некоторый принцип оптимального управления режимами ЗВО и путем использования специальных приемов теории оптимального управления отыскиваются значения режимных параметров, играющих роль управляющих воздействий на процесс кристаллизации слитка.

В частности, можно ввести в рассмотрение функционал

$$F = (L_{\text{мет}} - L_{\text{к}})^2,$$

где $L_{\text{мет}} = L_{\text{мет}}(\alpha_1, \alpha_2, v_{\text{л}}, \Delta T_0, \dots)$ – металлургическая длина МНЛЗ (полная глубина жидкой фазы), определенным образом зависящая от показателей теплового режима: $\alpha_1, \alpha_2, v_{\text{л}}, \Delta T_0$ и др.

В данном случае необходимо определить значения управляющих воздействий α_1, α_2 , при которых функционал $F = F(\alpha_1, \alpha_2, \dots)$ принимает экстремальное (минимальное) значение в диапазоне основных показателей процесса.

Вид функционала, минимизация которого сопровождается определением управляющих воздействий, зависит от вида доминирующих требований к качеству получаемого слитка. К примеру, можно сформулировать функционал

$$J = \int_0^{t_{\text{к}}} (T_{\text{пов}}^{\text{к}} - T_*)^2 dt,$$

где $T_{\text{пов}}^{\text{к}} = t_{\text{пов}}(\alpha_1, \alpha_2, v_{\text{л}}, \Delta T_0, \dots)$ – температура поверхности слитка в момент $t = t_{\text{к}}$ достижения клети тянущих (изгибающих) роликов, T_* – критическое значение температуры, определяемое показателями пластичности и прочности литой стали. В этом случае задача оптимального управления режимом вторичного охлаждения может быть сформулирована следующим образом: необходимо определить значения управляющих воздействий α_1, α_2 , при которых функционал $J = J(\alpha_1, \alpha_2, \dots)$ принимает экстремальное (минимальное) значение за время $t_{\text{к}}$ движения контрольного сечения слитка на основном участке технологической линии МНЛЗ.

В расчетах, результаты которых представлены ниже, используется решение «прямой задачи», в ходе которого варьируются следующие показатели процесса:

коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 для участков *I* и *II*;

концентрация углерода в стали, что находит отражение в задании показателей сплава $T_{\text{лик}}, T_{\text{сол}}$;

скорость вытягивания слитка $v_{\text{л}}$.

Результаты расчетов представлены в виде набора значений Δt_1 , Δt_2 , L_1 , L_2 и функционала

$$F = (L_{\text{мет}} - L_{\text{к}})^2$$

при различных исходных режимных показателях, близких к реальным значениям.

Кроме того, проведена отдельная серия расчетов по определению показателей зоны глобулярной (равноосной) кристаллизации, которая занимает, как правило, значительную часть сечения непрерывнолитых заготовок. Расчеты выполнены для условий кристаллизации заготовок сечением 125×125 мм на примере МНЛЗ-1, 2 РУП «БМЗ».

В соответствии с диаграммой состояния сплава Fe – С приняты следующие границы интервала кристаллизации для трех марок стали:

- сталь А (0,1 % С): $t_{\text{лик}} = 1525$ °С, $t_{\text{сол}} = 1495$ °С;
- сталь Б (0,4 % С): $t_{\text{лик}} = 1510$ °С, $t_{\text{сол}} = 1450$ °С;
- сталь В (0,7–0,8 % С): $t_{\text{лик}} = 1470$ °С, $t_{\text{сол}} = 1390$ °С.

Теплофизические свойства углеродистой стали приняли характерными для интервала повышенных температур: теплопроводность $\lambda = 29$ Вт/(м·°С); удельная теплоемкость $c = 0,69$ кДж/(кг·°С); скрытая теплота плавления $L = 272$ кДж/кг. Температура охлаждающей воды во всех случаях принята равной 20 °С. Начальную температуру расплавленной стали, поступающей в кристаллизатор из промежуточной емкости, принимали равной $t_{\text{лик}} + 40$ °С. Скорость вытягивания литых заготовок (скорость литья) в ходе расчетов варьировали для заготовок сечением 125×125 мм от 2 до 2,5 м/мин.

На основании результатов ранее выполненных экспериментальных исследований затвердевания заготовок, а также данных, предоставленных специалистами РУП «БМЗ», был сделан вывод, что фактически образование глобулярных кристаллов происходит при охлаждении заготовки на воздухе. При этом реальный коэффициент теплоотдачи в зоне II находится в пределах 140–160 Вт/(м²·К). Задаваясь величиной α_2 и учитывая, что реальное время полного затвердевания заготовки 125×125 мм в зависимости от марки стали и

скорости разливки составляет 3,5–5,5 мин, определяли длину зоны столбчатых кристаллов и коэффициент теплоотдачи в зоне I. На рисунке 1 приведены результаты расчетов для указанных трех групп стали со скоростью разливки 2 м/мин, анализ которых позволил определить оптимальные значения коэффициента теплообмена α_1 и соответственно расход воды в ЗВО.

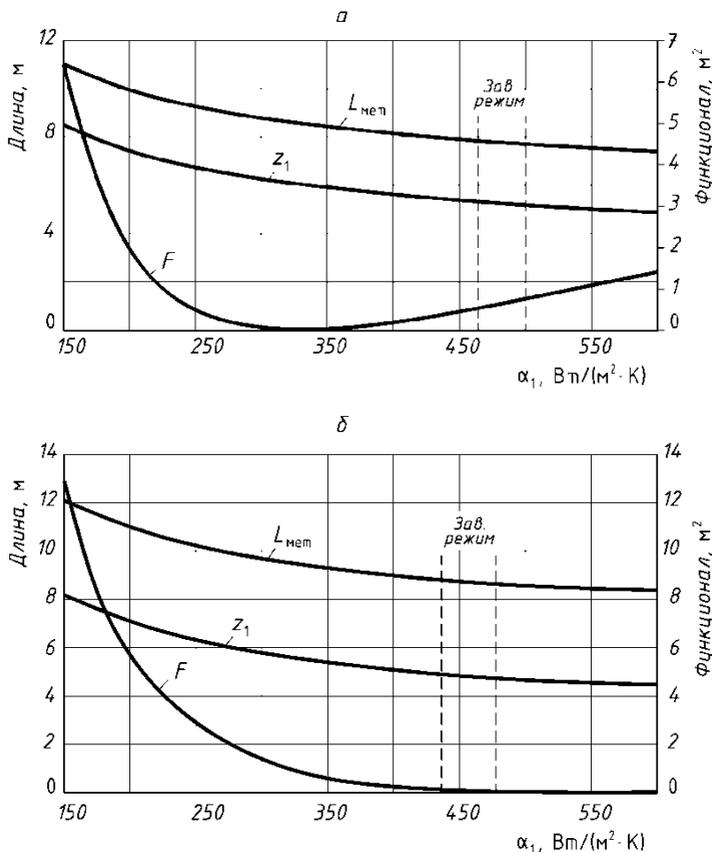


Рисунок 1 – Определение оптимального коэффициента теплообмена α_1 , металлургической длины ($L_{мет}$) и длины зоны столбчатой кристаллизации (z_1) при разливке заготовок сечением 125×125 мм со скоростью 2 м/мин в условиях МНЛЗ-1:

- a* – для стали с содержанием углерода – 0,1 % (группа А);
- б* – для стали с содержанием углерода – 0,4 % (группа Б);
- в* – для стали с содержанием углерода – 0,7 % (группа В)

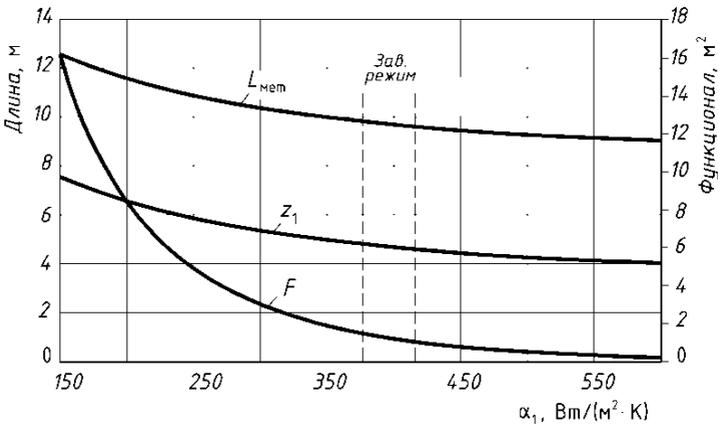


Рисунок 1 – Окончание

Для стали группы А (0,1 % С) $\alpha_1 = 330$ Вт/(м²·К), что соответствует расходу воды в ЗВО значению 227 л/мин. Согласно действующей на момент выполнения расчетного анализа технологической инструкции расход воды в ЗВО находится на уровне 350–380 л/мин. При этом глубина жидкой лунки $L_{мет}$ составляет 7,7–7,84 м, длина зоны столбчатой кристаллизации – $z_1 = 5,2–5,33$ м. Таким образом, для обеспечения оптимального режима разливки следует существенно уменьшить расход воды.

Для стали группы Б (0,4 % С) $\alpha_1 = 510$ Вт/(м²·К), расход воды при этом равен 355 л/мин и соответствует действующему режиму охлаждения (300–330 л/мин). Глубина жидкой лунки достигает 8,77–8,93 м, а длина зоны столбчатой кристаллизации – 4,86–5,02 м. Для того, чтобы заготовка из среднеуглеродистой стали затвердела до момента попадания в зону правки, следует незначительно увеличить расход воды в ЗВО.

При разливке стали группы В (0,7 % С) очевидно, что функционал F не достигает своего минимума, т. е. при достижении заготовкой зоны правки она имеет жидкую сердцевину. При этом длина жидкой лунки составляет 9,64–9,83 м, время затвердевания примерно 4,82–4,92 мин, длина зоны столбчатой кристаллизации – 4,69–4,89 м. Т. е. в этом случае необходимо ин-

тенсифицировать процесс затвердевания за счет существенного увеличения расхода воды в ЗВО.

Аналогичные расчеты были выполнены для случая разливки заготовки 125×125 мм со скоростью 2,5 м/мин, при этом основное внимание уделено разливке высокоуглеродистых сталей (группа В), так как к ней предъявляются повышенные требования с точки зрения качества. Учитывая выводы, приведенные выше, для обеспечения условий затвердевания заготовки до попадания в зону правки рассмотрены дополнительные технологические приемы, например, охлаждение заготовок в зоне глобулярной кристаллизации с помощью специальных вентиляторов либо организацией дополнительной секции ЗВО. Результаты расчетов при использовании дополнительного охлаждения приведены на рисунках 2, 3.

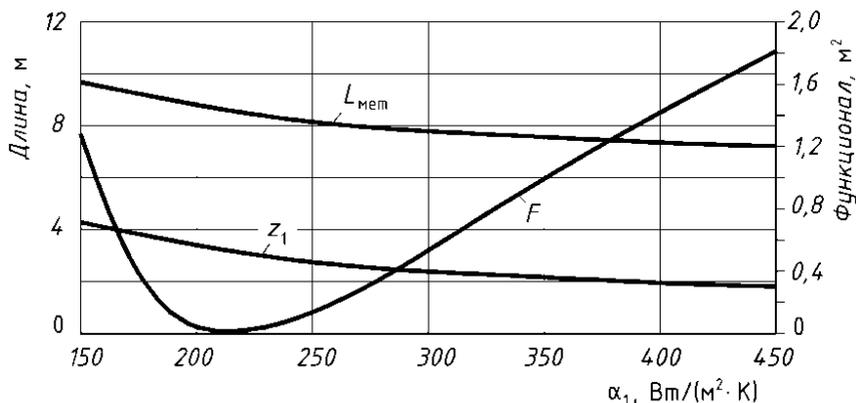


Рисунок 2 – Зависимость металлургической длины и продолжительности глобулярной кристаллизации заготовки сечением 125×125 мм из высокоуглеродистой стали от интенсивности охлаждения в зоне II при разливке со скоростью 2 м/мин

Очевидно, что при скорости разливки 2 м/мин увеличение коэффициента теплоотдачи в зоне глобулярной кристаллизации, то есть организация дополнительного охлаждения между ЗВО и трайб-аппаратом, дает реальный положительный эффект. Такого же результата можно добиться, установив дополнительные вентиляторы охлаждения либо секцию ЗВО с расходом воды $1-1,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. При

повышении скорости разливки до 2,5 м/мин (рисунок 3) функционал F достигает минимума только при $\alpha_1 = 450$ Вт/(м²·К). Однако такой интенсивности теплообмена представляется возможным достигнуть исключительно при организации водяного охлаждения. Но это может привести к переохлаждению поверхности заготовки и, как следствие, к образованию поверхностных дефектов.

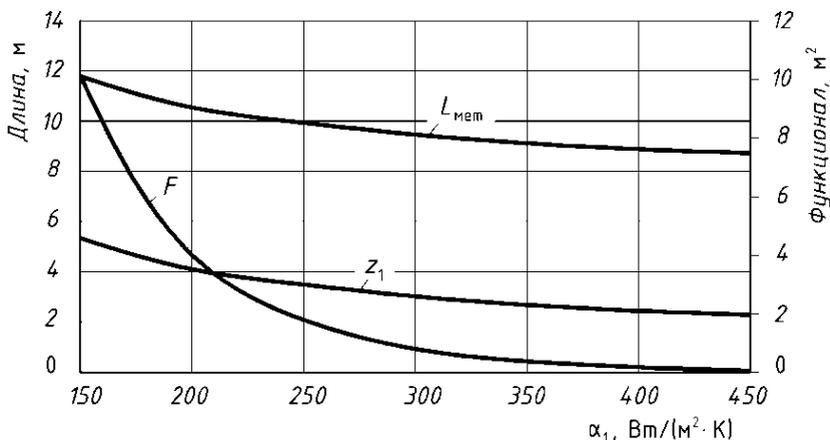


Рисунок 3 – Зависимость металлургической длины и продолжительности глобулярной кристаллизации заготовки сечением 125×125 мм от интенсивности охлаждения в зоне II при разливке со скоростью 2,5 м/мин

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований следует сделать следующий вывод: гарантировать получение качественного непрерывнолитого слитка из высокоуглеродистой стали в условиях МНЛЗ-1 можно лишь при разливке со скоростью ≤ 2 м/мин. Причем, в зоне глобулярной кристаллизации целесообразно установить вентиляторы либо дополнительную секцию ЗВО.

Список литературы

1. **Стальной слиток:** в 3-х т. / Ю. А. Самойлович [и др.]. – Минск: Белорусская наука, 2000. – Т. 1: Управление кристаллической структурой. – 583 с.

2. Исследование закономерностей столбчатой и глобулярной кристаллизации при непрерывном литье на радиальных МНЛЗ / В. И. Тимошпольский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2003. – № 2. – С. 105–109.

3. Комплексные исследования процессов формирования непрерывнолитых стальных заготовок с целью повышения качества / В. И. Тимошпольский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2004. – № 1. – С. 5–11.

References

1. *Stalnoi slitok*: v 3 t. [Steel ingot. In 3 volumes] / Yu. A. Samoilovich [et al.]. – Minsk: Belorusskaya nauka Publ., 2000. – T. 1: *Upravlenie kristallicheskoj strukturoi* [Vol. 1: Crystal structure control]. – 583 p.

2. *Issledovanie zakonomernostei stolbchatoi i globulyarnoi kristallizatsii pri nepreryvnom lite na radialnykh MNLZ* [Study of the patterns of columnar and globular crystallization during continuous casting on radial continuous casters] / V. I. Timoshpol'skij [et al.] // *Lite i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2003. – No. 2. – P. 105–109.

3. *Kompleksnye issledovaniya protsessov formirovaniya nepreryvnolitykh stalnykh zagotovok s tselyu povysheniya kachestva* [Comprehensive studies of the processes of forming continuously cast steel billets in order to improve quality] / V. I. Timoshpol'skij [et al.] // *Lite i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2004. – No. 1. – P. 5–11.

Поступила 16.10.2023

Received 16.10.2023