

УДК 621.74.01

Д.А. Мусунов, Е.В. Синегин, В.Г. Герасименко,
Л.С. Молчанов, С.В. Журавлёва

ОБОСНОВАНИЕ ЧИСЕЛ ПОДОБИЯ И МАСШТАБОВ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПОРИСТОСТИ В НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ

Анотація. У статті наведено опис підготовчого етапу експерименту з вивчення закономірностей формування центральної пористості в об'ємі безперервнолитої заготовки. Ґрунтуючись на основних положеннях теорії подоби і накопиченому в даній тематиці досвіді, авторами запропоновані числа подоби і розраховані масштаби для імітації процесів, що протікають на фінальних етапах тверднення заготовки і призводять до утворення внутрішнього дефекту – центральної пористості.

Ключові слова: фізичне моделювання, безперервне розливання, центральна пористість.

Аннотация. В статье приводится описание подготовительного этапа эксперимента по изучению закономерностей формирования центральной пористости в объёме непрерывнолитої заготовки. Основываясь на основных положениях теории подобия и накопленном в данной тематике опыте, авторами предложены числа подобия и рассчитаны масштабы для имитации процессов протекающих на финальных этапах затвердевания заготовки, которые приводят к образованию внутреннего дефекта – центральной пористости.

Ключевые слова: физическое моделирование, непрерывная разливка, центральная пористость.

Annotation. The article describes the preparatory stage of the experiment on the study of regularities in the formation of central porosity in the volume of continuous cast billets. Based on the basic principles of the similarity theory and the experience accumulated in this subject, the authors proposed similarity numbers and calculated scales to simulate the processes of solidification of the billet that take place at the final stages of solidification, which lead to the formation of an internal defect – central porosity.

Key words: physical modeling, continuous casting, central porosity.

Введение

Процесс непрерывной разливки стали является наиболее передовым и автоматизированным процессом сталеплавильного производства, а его производительность и качество продукции существенно превышают морально устаревший аналог, широко использующийся на отечественных заводах – разливку в слитки. Улучшение условий охлаждения стали при непрерывной разливке позволило существенно повысить физическую и химическую однородность металла, однако полностью подавить некоторые кристаллизационные процессы, приводящие к формированию дефектов, по-прежнему достаточно сложно.

Постановка цели и задач исследования

Одним из характерных дефектов непрерывнолитой заготовки является центральная пористость (ЦП), которая в объёме заготовки может проявляться как в виде отдельных усадочных полостей так и, сливаясь в сплошную пору, образовывать прерывающую местами продольную полость диаметром до 15 мм. Причинами формирования ЦП являются специфические условия формирования структуры, связанные с относительно глубокой лункой жидкого металла. Фронт кристаллизации по высоте слитка, ввиду значительной протяженности лунки жидкого металла, сходится к концу затвердевания под очень малым углом, что определяет наличие мостов и перехватов в районе теплового центра заготовки [1-3].

Развитию ЦП способствуют факторы, приводящие к увеличению протяжённости жидкой лунки металла в заготовке: скорость разливки, интенсивность охлаждения, температура металла и др. В работе [3] помимо перечисленных причин указывается также состояние поддерживающей системы, однако механизм влияния этого фактора на условия формирования ЦП не объяснён. Несмотря на то, что данный дефект непрерывнолитой заготовки не является браковочным (исчезает при прокатке с большой степенью обжатия) и не вызывает нежелательных последствий, ему часто сопутствуют такие нежелательные дефекты как внутренние трещины (осевые, в осевой и промежуточной зонах), осевая ликвация и транскристаллизация [3].

Наличие перечисленных дефектов является ярким свидетельством неверного выбора режима вторичного охлаждения заготовки и температурно-скоростного режима разливки. Задачей эксперимента является изучение теплофизических условий формирования ЦП для разработки рациональных режимов охлаждения заготовки.

Параметризация модели

Ключевой задачей при определении чисел подобия для физического моделирования является выбор наиболее значимых параметров, влияющих на исследуемый процесс. Учёт в модели всех параметров процесса сделает невозможным его моделирование, поскольку невозможно будет подобрать модельные вещества и условия проведения эксперимента подобные реальному аналогу.

Общепризнано использование для моделирования процессов кристаллизации трёх чисел подобия Био Bi , Коссовича Ko (критерий фазового перехода) и Фурье Fo [4-6]. В работе [6] авторами приведена функциональная зависимость для определения толщины ξ затвердевшей корочки

$$\xi = f(\alpha, \Delta T, \lambda, c, \rho, Q_0, \tau), \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²·К; ΔT – разница температур между фронтом кристаллизации и поверхностью отливки, К;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; c – удельная теплоёмкость вещества, Дж/кг·К; ρ – плотность вещества, кг/м³; Q_0 – удельная (скрытая) теплота кристаллизации, Дж/кг; τ – время, с.

Наиболее полно особенности гидродинамического и фильтрационного питания слитков отражены В.А. Ефимовым в работе [7]. Автор подчёркивает, что на финальных этапах кристаллизации слитка процесс массопереноса жидкости можно разделить на два вида: 1) гидродинамический массоперенос в довольно больших ветвях дендритов при наличии скоростного профиля по их сечению и 2) последующий фильтрационный массоперенос в мелких ячейках межветвенного пространства дендритов под действием капиллярных сил. Для случая формирования ЦП при непрерывной разливки стали ключевую роль играет именно первый вид, при котором в объёме непрерывнолитой заготовки формируется широкая столбчатая зона (транскристаллизация). Дендриты в этой зоне, смыкаясь в области теплового центра заготовки, формируют пористую структуру, усложняя питание нижележащих объёмов заготовки. При наличии в осевой области заготовки зоны равноосных кристаллов массоперенос происходит по второму виду, а ЦП приобретает вид многочисленных небольших пор [2].

По данным работы [7] условия питания слитка помимо скорости продвижения фронта кристаллизации описываются также ферростатическим давлением металла p «запрессовывающим» жидкую фазу в двухфазную зону заготовки и силы трения f_{mp} , направленной в сторону, противоположную вектору скорости. Глубина проникновения жидкой фазы в объём заготовки равна [7]:

$$L = \frac{pd^2}{32\eta v_{кр}}, \quad (2)$$

где p – ферростатическое давление металла, Па; d – средний диаметр междендритных пространств, м; η – динамическая вязкость металла, Па·с; $v_{кр}$ – скорость продвижения фронта кристаллизации, м/с.

Учитывая помимо вышеперечисленных параметров объёмную усадку ε_v вещества при переходе из жидкого в твёрдое состояние, которая, согласно [2], также увеличивает склонность заготовок к формированию ЦП, получаем следующую функциональную зависимость для диаметра ЦП δ

$$\delta = f(\alpha, \Delta T, \lambda, c, \rho, Q_0, \tau, p, \eta, l, \varepsilon_v), \quad (3)$$

где l – характерный размер (половина толщины заготовки), м.

Используя π -теорему [6,8] получаем критериальную зависимость

$$L = f(\text{Bi}, \text{Ko}, \text{Fo}, \text{La}_m, \text{Pr}), \quad (4)$$

где $L = \delta/l\varepsilon_v$ – линейный симплекс численно равный соотношению относительной ширины поры к усадке вещества при затвердевании; $\text{Bi} = \alpha l/\lambda$ – число Био, являющееся мерой внешнего и внутреннего тепловых сопротивлений; $\text{Ko} = Q_0/c\Delta T$ – число Коссовича, являющееся

отношением тепла кристаллизации к теплоте охлаждения; $Fo = a\tau/l^2$ – число Фурье или безразмерное время; $La_m = p\tau/\eta$ – модифицированное число Лагранжа, показывающее отношение давления столба металла к силам вязкого трения жидкости; $Pr = \eta c/\lambda$ – число Прандтля.

Рассмотрим возможность использования полученных критериев для физического моделирования. Соблюдение числа Прандтля в данных условиях не представляется возможным, поскольку его величина для жидкой стали (0,14) на несколько порядков отличается от всех широко применяемых для моделирования кристаллизационных процессов веществ: камфен – 550, парафин – 88, смесь 90 % нафталина и 10% толуола – 53, вода – 6 (рассчитано по данным работы [6]). Пренебрежение этим критерием требует доказательства его несущественности или автомодельности в исследуемой области значений.

Определение масштабов моделирования производим по методике применённой ранее авторами в работе [9]. Произвольно задаёмся масштабами 6 параметров ($\rho, l, \lambda, c, r, \nu$), значения остальных определяем из условия (5). Результаты расчёта масштабов для наиболее распространённых модельных веществ приведены в табл. 1.

$$\left\{ \begin{array}{l} Bi = idem, \\ Ko = idem, \\ Fo = idem, \\ La_m = idem. \end{array} \right. \quad (5)$$

Таблица 1

Масштабы моделирования для некоторых модельных веществ

Моделируемый параметр	Модельное вещество			
	Камфен	Парафин	Гипосульфит натрия	Смесь нафталина с толуолом
Плотность ρ	1:8,52	1:9,42	1:4,26	1:6,98
Линейный масштаб l	1:5	1:5	1:5	1:5
Теплопроводность λ	1:1265	1:121	1:31,3	1:80,8
Удельная теплоёмкость c	3,48:1	5,59:1	4,73:1	3,59:1
Теплота кристаллизации r	1:6,65	1:1,78	1:1,73	1:1,88
Кинематическая вязкость ν	11,4:1	10,5:1	11,9:1	11:1
Температура Δt	1:23,1	1:10	1:8,19	1:6,77
Время τ	20,7:1	2,88:1	1,39:1	1,66:1
Давление p	1:15,4	1:2,59	2,01:1	1:1,06
Коэффициент температуропроводности α	1:253	1:24,3	1:6,26	1:16,2

По данным [1,2] немаловажную роль в процессе формирования ЦП играет также угол смыкания жидкой лунки на финальных этапах затвердевания заготовки. Подобие этого угла на модели можно обеспечить, придав охлаждающим поверхностям определённую конусность, величину которой можно рассчитать исходя из режимов разлива. Тангенс угла φ наклона фронта кристаллизации к оси заготовки равен отношению

толщины ξ твёрдой корки сформированной на протяжении участка заготовки длиной h (рис. 1).

Принимая, что толщина корки во времени изменяется по закону квадратного корня, получаем следующую формулу для определения угла ϕ в зависимости от режима разливки

$$\operatorname{tg} \phi \equiv \frac{\xi}{h} = \frac{k\sqrt{\tau}}{h} = \frac{k\sqrt{h/w}}{h} = \frac{k}{\sqrt{hw}}, \quad (6)$$

где k – коэффициент затвердевания заготовки, м/мин^{0,5}; h – длина исследуемого участка заготовки (см. рис. 1), м; w – скорость вытягивания заготовки, м/мин.

Для условий разливки блюмовых заготовок величина угла ϕ колеблется в пределах 2,3-6°, в зависимости от скорости разливки условий охлаждения и марки разливаемой стали.

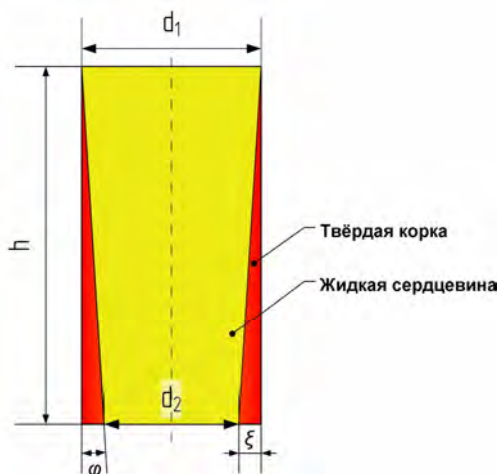


Рисунок 1 – Обеспечение подобия угла смыкания жидкой лунки

Выводы

В статье предложена методика, позволяющая экспериментально изучить особенности гидродинамического и фильтрационного питания нижних горизонтов непрерывнолитой заготовки металлическим расплавом. Используя основные положения теории подобия и π -теоремы предложены числа подобия и рассчитаны масштабы для имитации процессов, сопутствующих формированию центральной пористости в объёме непрерывнолитой заготовки. Полученные результаты позволят установить рациональные режимы вторично охлаждения заготовки и температурно-скоростные режимы разливки стали на МНЛЗ, которые позволят предотвратить формирование центральной пористости и других сопутствующих дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розливання і кристалізація сталі [Навч. посібник] / В.І. Баптизманський, Л.С. Рудой, Є.І. Ісаєв [та ін.]. – К.: Вища школа, 1993. – 267 с.
2. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали [Учебник] / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.

3. Ботников С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С.А. Ботников. – Волгоград, 2011. – 97 с.
4. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – Ленинград, М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. – 416 с.
5. Мастрюков Б.С. Теплофизика металлургических процессов [Учеб. для ВУЗов] / Б.С. Мастрюков. – М.: МИСИС, 1996. – 268 с.
6. Эльдарханов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование / А.С. Эльдарханов, В.А. Ефимов, А.С. Нурадинов. – М.: Машиностроение, 2001. – 208 с.
7. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
8. Марков Б.Л. Физическое моделирование в металлургии / Б.Л. Марков, А.А. Кирсанов. – М.: Металлургия, 1984. – 119 с.
9. Расчёт параметров физического моделирования процессов распределения инокуляторов в кристаллизаторе МНЛЗ / Е.В. Синегин, Б.М. Бойченко, В.Г. Герасименко [и др.]. – Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2012.– №7.– С. 127-130.