

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.745.334:669.13:662.69

В.Н. Гуцин, В.А. Ульянов

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗВИТИЕ ДВУХФАЗНОЙ ЗОНЫ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Произведена оценка влияния на развития двухфазной зоны теплового экранирования слитков, электрогидроимпульсной обработки расплава и создания вращательных моментов в жидкой фазе при использовании безнапорных разливочных стаканов со смещёнными выходными каналами.

Приведена методика расчёта двухфазной зоны с учётом внешних воздействий. Данная методика позволяет прогнозировать влияние внешних воздействий на динамику формирования слитков и отливок при изменении теплоотдачи от жидкой фазы. Произведена оценка влияния на развитие двухфазной зоны теплового экранирования слитков и создание вращательных моментов в жидкой фазе при использовании безнапорных разливочных стаканов со смещёнными выходными каналами.

*Ключевые слова:* двухфазная зона, внешние воздействия, разливочные стаканы, непрерывная разливка, стальные заготовки.

Нестационарная теплопроводность двухфазной зоны (ДЗ) описывается уравнением Фурье с распределёнными внутренними источниками теплоты. Эту задачу можно расширить, вводя в уравнение, кроме скрытой теплоты кристаллизации, параметры, характеризующие подвод энергии и изменение условий теплообмена при статических и динамических внешних воздействиях на расплав. К числу таких воздействий относятся: изменение условий теплообмена при тепловом экранировании (ТЭ) слитков [1-3]; электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) расплава [1-2, 4]; создание вращательных моментов в жидкой фазе непрерывнолитых заготовок при использовании безнапорных разливочных стаканов со смещёнными выходными отверстиями [1, 5] или при электромагнитном перемешивании и др.

Если пренебречь различием плотностей твёрдой и жидкой фаз, которое для сталей с содержанием углерода от 0,2 до 0,4% не превышает 4,5%, то в общем случае уравнение теплопроводности ДЗ после преобразования в безразмерном виде будет [1]:

$$\partial\theta_{ж-т} / \partial Fo = \partial^2\theta_{ж-т} / \partial X^2 + N_1^{-1}(1-\chi)\partial W / \partial Fo, \quad (1)$$

где  $Fo = a\tau / X_o^2$  – число подобия Фурье;  $X = x / X_o$ ;  $N_1 = C(t_{л} - t_c / Q_o)$  – аналог числа подобия фазового перехода;  $\chi = \lambda_{т}Nu_{п} / (\lambda_{ж}Bi_{с})$ ;  $\theta_{п}, \theta_{с}$  – безразмерные температуры поверхности и перегрева расплава;  $Nu = \alpha_{ж}X_o / \lambda_{ж}$  – число подобия Нуссельта;  $Bi = \alpha_{т}X_o / \lambda_{т}$  – число подобия Био;  $W$  – доля твёрдой фазы;  $\partial W / \partial \tau$  – темп выделения твёрдой фазы,  $X_o$  – характерный размер (ширина ДЗ).

Перейдём в систему координат, перемещающихся вместе с изотермой солидуса со скоростью  $v$ . Скорость продвижения изотермы солидуса можно определить либо на физической модели [1-2], либо расширением математической модели, образуя систему уравнений с учётом теплопроводности затвердевшей корки и теплообмена в системе «слиток (заготовка) – форма – окружающая среда» [1, 6].

В новой системе координат относительное время и координата будут иметь вид:

$$Fo^* = Fo, X^* = X - Pe^*, \quad (2)$$

где  $Pe^* = \nu X_o / a$  – аналог числа подобия Пекле.

В новой системе координат получаем, опуская индексы ж-т,

$$\partial^2 \theta / \partial X^2 = \partial^2 \theta / \partial X^{*2}; \quad \partial \theta / \partial Fo = -Pe^* \partial \theta / \partial X^* + \partial \theta / \partial Fo^*,$$

где считаем  $\partial \theta / \partial Fo^* = 0$  и  $\partial W / \partial Fo = Pe^* \partial W / \partial X^*$ . (3)

Таким образом, опуская звёздочки, получаем следующее уравнение теплопроводности ДЗ:

$$\partial^2 \theta / \partial X^2 + Pe \partial \theta / \partial X + N^{-1} Pe (1 - \chi) \partial W / \partial X = 0. \quad (4)$$

Долю твёрдой фазы представим в виде степенной функции

$$W = (x / X_o)^n = X^n, \quad \partial W / \partial X = n X^{n-1} \text{ и вводя обозначение } A = N^{-1} (1 - \chi)n,$$

получаем

$$\partial^2 \theta / \partial X^2 + Pe \partial \theta / \partial X + A Pe^{n-1} = 0 \quad (5)$$

Производя дополнительную замену переменной  $Z = \partial \theta / \partial X$ , имеем уравнение

$$Z' + Pe Z + A Pe X^{n-1} = 0, \quad (6)$$

решение которого в общем случае будет

$$Z = e^{-PeX} (C_1 - A Pe \int X^{n-1} e^{PeX} dX). \quad (7)$$

В частном случае, например при  $n = 2$ , что соответствует железоуглеродистому сплаву с содержанием углерода 0,8%, получаем

$$Z = C_1 e^{-PeX} - A Pe (X Pe^{-1} - Pe^{-2}). \quad (8)$$

Принимая граничные условия

$$\begin{cases} -\partial \theta / \partial X \Big|_{X=1} = Q_{\text{ж}} & \text{на границе ликвидуса} \\ -\partial \theta / \partial X \Big|_{X=0} = Q_{\text{т}} & \text{на границе солидуса,} \end{cases} \quad (10)$$

где  $Q_{\text{ж}} = q_{\text{ж}} X_o / \lambda_{\text{ж}} (t_{\text{л}} - t_{\text{с}})$  и  $q_{\text{ж}} = \alpha_{\text{ж}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{с}})$  – относительный тепловой поток и плотность теплового потока от жидкого металла к фазовой границе;  $Q_{\text{т}} = q_{\text{т}} X_o / \lambda_{\text{т}} (t_{\text{с}} - t_{\text{о}})$  и  $q_{\text{т}} = \alpha_{\text{т}} (t_{\text{с}} - t_{\text{о}})$  – относительный тепловой поток и плотность теплового потока от затвердевшей корочки  $\xi$ . Тогда

$$\begin{aligned} \partial \theta / \partial X = Z = C_1 e^{-PeX} - A (A - Pe^{-1}); \quad \theta = -C_1 e^{-PeX} Pe - 0,5 A X^2 + A X Pe^{-1} + C_2; \\ Q_{\text{ж}} = -C_1 e^{-Pe} + A (1 - Pe^{-1}); \quad C_1 = [A (1 - Pe^{-1}) - Q_{\text{ж}}] e^{Pe}; \\ \theta = Pe^{-1} (-A + A Pe^{-1} + Q_{\text{ж}}) e^{Pe(1-\chi)} - 0,5 A X^2 + A X Pe^{-1} + C_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Определяя  $C_2$ , получим выражение для  $\theta$ :

$$C_2 = Pe^{-1} C_1 = Pe^{-1} [A (1 - Pe^{-1}) - Q_{\text{ж}}] e^{Pe}; \quad (11)$$

$$\theta = Pe^{-1} e^{Pe} [A (1 - Pe^{-1}) - Q_{\text{ж}}] (1 - e^{-PeX}) - 0,5 A X^2 + A X Pe^{-1}. \quad (12)$$

Это уравнение позволяет определить распределение температуры в ДЗ при заданных числах подобия и граничных условиях.

Уравнение для ширины ДЗ в зависимости от условий её формирования получаем из условия  $\theta \Big|_{X=1} = 1$ :

$$1 = Pe^{-1} e^{Pe} [A (1 - Pe^{-1}) - Q_{\text{ж}}] (1 - e^{-Pe}) - 0,5 A + A Pe^{-1}. \quad (13)$$

С учётом того, что  $A = N^{-1} (1 - \chi)n = 2N^{-1} (1 - \chi)$ ,  $Q_{\text{ж}} = \frac{q_{\text{ж}} X_o}{\lambda_{\text{ж}} (t_{\text{л}} - t_{\text{с}})} = \frac{q_{\text{ж}} \nu X_o}{c \rho \nu (t_{\text{л}} - t_{\text{с}}) a} = Nu^* Pe$ ,

где  $Nu^* = \frac{q_{\text{ж}}}{c \rho \nu (t_{\text{л}} - t_{\text{с}})}$  – аналог критерия Нуссельта, получаем

$$\left[ A(1 - \text{Pe}^{-1}) - \text{Nu}^* \text{Pe} \right] (1 - e^{-\text{Pe}}) + A = (1 + 0,5A) \text{Pe}. \quad (14)$$

Далее производим ряд преобразований и получаем окончательно

$$\text{Nu}^* = \frac{A \text{Pe}^{-1} (1 - \text{Pe}^{-1}) e^{-\text{Pe}} + 1 + 0,5A - A \text{Pe}^{-2}}{e^{-\text{Pe}} - 1}. \quad (15)$$

В квазистационарном приближении можно считать, что  $\text{Pe} = (X / X_0) \text{Fo}^{-1}$ , а при  $X = X_0, \text{Pe} = \text{Fo}^{-1}$ . Ширина двухфазной зоны  $X_0$  входит в  $\text{Pe}$ ,  $A$  и находится из решения уравнения (15) при заданных условиях теплообмена.

При тепловом экранировании определялись изменения условий теплообмена в системе слиток – изложница – окружающая среда [5]; при ЭГИО и вращении расплава учитывалось изменение характера и интенсивности потоков расплава [2-3].

Коэффициенты теплоотдачи от потока расплава определяются режимом движения и скоростью потока. При турбулентном режиме ( $\text{Re} > 10^4$ ) коэффициент теплоотдачи находится из критериального уравнения [2]:

$$\text{Nu} = 2,5 + 0,36 \text{Pe}^{2/3}. \quad (16)$$

При ламинарном режиме ( $\text{Re} < 10^3$ ):

$$\text{Nu} = 0,75 \left[ (1 + \text{Pe})^{1/3} \text{Pe} \right]^{1/2}, \quad (17)$$

где  $\text{Nu} = \alpha_{\text{ж}} l / \lambda_{\text{ж}}$  – критерий Нуссельта для жидкой фазы;  $\text{Pe} = \omega l / a_{\text{ж}}$  – критерий Пекле;  $\text{Re} = \omega l / \nu_{\text{ж}}$  – критерий Рейнольдса;  $a_{\text{ж}}$  – коэффициент температуропроводности расплава;  $l$  – характерный размер;  $\nu_{\text{ж}}$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\omega$  – скорость потока расплава.

Коэффициент теплоотдачи от потока расплава определяем соответственно:

- при турбулентном режиме  $\alpha_{\text{ж}} = \lambda_{\text{ж}} \left[ 2,5 + 3,6 (\omega l / a_{\text{ж}})^{2/3} \right] / l$ ; (18)

- при ламинарном режиме  $\alpha_{\text{ж}} = 0,75 \lambda_{\text{ж}} \left[ (1 + \omega l / a_{\text{ж}})^{1/3} \omega l / a_{\text{ж}} \right]^{1/2} / l$ . (19)

При расчетах использовались следующие исходные данные для жидкой стали:

$$\lambda_{\text{ж}} = 23,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}, c_{\text{ж}} = 0,83 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}, \rho_{\text{ж}} = 7200 \text{ кг/м}^3, \nu_{\text{ж}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

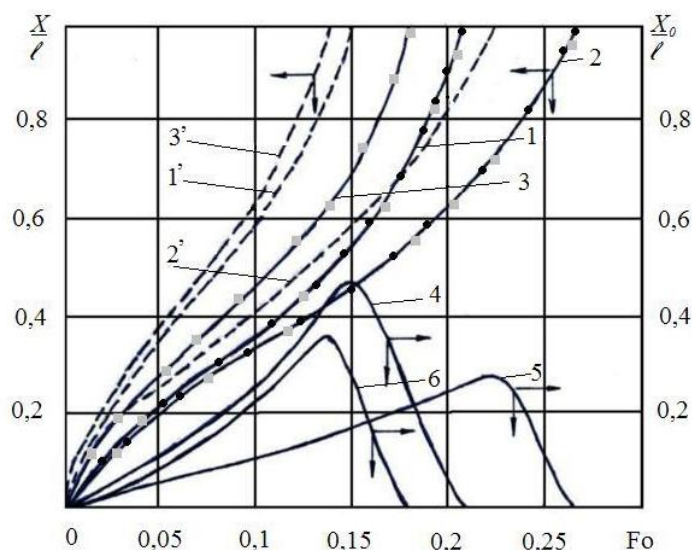
$$a_{\text{ж}} = \lambda_{\text{м}} / c_{\text{м}} \rho_{\text{м}} = 3,95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

На рис. 1 приведены кривые, характеризующие развитие ДЗ в подприбыльном сечении кузнечных слитков массой 13т ( $l=0,6\text{м}$ , ст. 40) при ТЭ и ЭГИО. При ТЭ верхней части слитков термогравитационная конвекция выражена слабо, скорость конвективного движения расплава в 2 – 2,5 раза ниже, чем в контрольном слитке [1]. Это приводит, в соответствии с выражением (19), к понижению  $\alpha_{\text{ж}}$  в 1,5 – 1,8 раза при уменьшении  $\alpha_{\text{д}}$  в 30 раз после прогрева изложницы [3]. То есть в этом случае определяющим является уменьшение плотности теплового потока с наружной поверхности изложницы и от зеркала металла в окружающую среду. При этом время затвердевания увеличивается на 29% с 3,5 до 4,5 часа, а время снятия перегрева – на 50% с 2,0 до 3,0 часа. Ширина ДЗ к концу снятия перегрева уменьшается в 1,74 раза при более длительном нахождении стали в двухфазном состоянии. Максимум ширины ДЗ соответствует времени снятия перегрева, а дальнейшее её уменьшение связано только с продвижением изотермы солидуса. Таким образом, ТЭ характеризуется более длительным временем снятия перегрева, снижением протяженности зоны двухфазного состояния и продолжительности пребывания в ней. Это способствует более полному протеканию процесса пропитки ДЗ и созданию благоприятных условий для всплывания неметаллических включений, что в конечном итоге приводит к снижению усадочных дефектов и повышению плотности металла [3].

При ЭГИО ударная волна приводит к созданию кавитационных явлений и образова-

нию локальных турбулентных полей вдоль фронта затвердевания. Это приводит к интенсификации теплоотдачи от жидкой фазы, а также к разрушению ДЗ и активизации в качестве зародышей кристаллизации примесных образований [1, 4]. Это повышает  $\alpha_{ж}$  в 2,5–3,0 раза при незначительном изменении  $\alpha_{т}$ . То есть в этом случае определяющей является теплоотдача от жидкой фазы. Применение ЭГИО с оптимальными параметрами использования этого метода [4] вызывает уменьшение времени затвердевания на 14,6% (с 3,5 до 3,0 часа) и времени снятия перегрева на 8,5% при уменьшении ширины ДЗ к этому моменту на 25%. Таким образом, импульсная обработка расплава приводит к снижению ширины ДЗ при незначительном снижении времени нахождения в двухфазном состоянии. При этом подавляется развитие ликвационных процессов и получается более однородный по химическому составу и структуре металл [2].

Учитывая положительные стороны ТЭ и ЭГИО наилучшие результаты можно получить при комплексном использовании этих двух методов внешних воздействий при формировании слитков. Причём повышение теплоотдачи от жидкой фазы является значительно более эффективным фактором уменьшения ДЗ, чем понижение теплоотдачи от твёрдой фазы из-за повышения термического сопротивления твёрдой корки в процессе затвердевания.

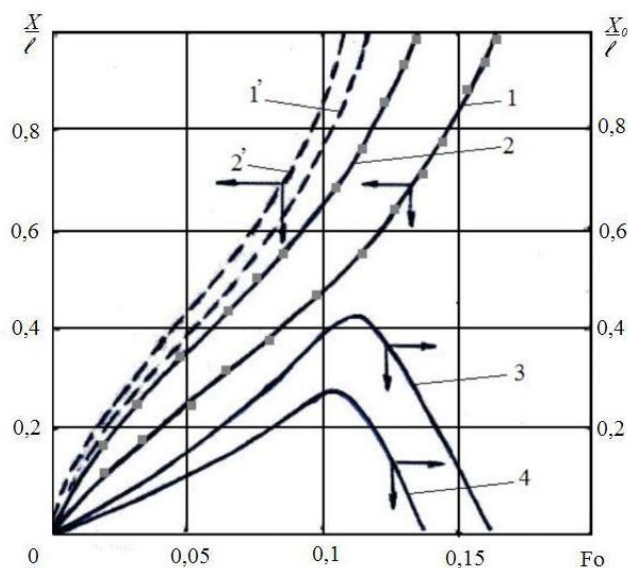


**Рис. 1.** Кривые продвижения изотерм солидуса и ликвидуса (пунктирные кривые) и развития ДЗ в подприбыльном сечении кузнечного слитка массой 13 тонн:

1, 1', 4 – контрольного слитка; 2, 2', 5 – при ТЭ; 3, 3', 6 – при ЭГИО;

● – экспериментальные данные (сталь 40); ■ – данные физического моделирования

На рис. 2 приведены результаты исследования по влиянию скорости вращения расплава в кристаллизаторах МНЛЗ на развитие ДЗ при использовании безнапорных разливочных стаканов со смещёнными выходными каналами [5]. Их применение позволяет создать горизонтальные составляющие потока расплава вдоль фронта затвердевания на уровне 0,08 – 0,18 м/с. При скоростях потока  $\omega > 0,3$  м/с ( $Re > 0,94 \cdot 10^4$ ) режим течения можно считать турбулентным и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{ж}$  увеличивается в этом случае в 3,0 – 3,5 раза по сравнению с использованием прямоточного стакана. При этом происходит уменьшение времени затвердевания на 16%, времени снятия перегрева на 10% при сокращении ширины ДЗ до 30%. Использование этого метода, так же, как и ЭГИО, позволяет интенсифицировать процесс затвердевания, переходя к повышенным скоростям разливки, и повышать качество литого металла [5].



**Рис. 2. Кривые продвижения изотерм солидуса и ликвидуса (пунктирные кривые) и развития ДЗ непрерывнолитого стального слитка сечением 330x360 при скорости вытягивания 0,5 м/мин:**

1, 1', 3 – контрольного слитка; 2, 2', 4 – при вращении расплава; ■ – данные физического моделирования

#### Библиографический список

1. **Гущин, В.Н.** Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок / В.Н. Гущин, В.А. Ульянов; НГТУ. – Н. Новгород, 2006. – 141 с.
2. **Скворцов, А.А.** Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, В.А. Ульянов. – М.: Металлургия, 1991. – 216 с.
3. **Китаев, Е.М.** Повышение качества 13-тонных кузнечных слитков путём увеличения направленности затвердевания / Е.М. Китаев, В.Н. Гущин, М.А. Ларин // Сталь. 1988. №4. С. 38–39.
4. **Ульянов, В.А.** Сравнительный анализ моделирования и промышленных исследований активных внешних воздействий на формирование слитков / В.А. Ульянов, В.Н. Гущин, Е.М. Китаев // Изв. вузов. ЧМ. 1998. №11. С. 15–19.
5. Управление потоками стали в кристаллизаторах МНЛЗ с помощью разливочных стаканов / В.И. Ильин [и др.] // Изв. вузов. ЧМ. 2002. №9. С. 19–22.
6. **Скворцов, А.А.** Теплопередача в системе слиток – изложница – окружающая среда / А.А. Скворцов, Е.М. Китаев, В.Н. Гущин // Изв. вузов. ЧМ. 1981. №1. С. 118–121.

Дата поступления  
в редакцию 03.02.2014

V.N. Gushchin, V. A. Ulyanov

#### STUDY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL INFLUENCES ON THE DEVELOPMENT ZONE TWO-PHASE STEEL BLANKS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Abstract:** the design procedure of the two-phase zone, taking into account external influences. This technique allows you to predict the impact of external influences on the dynamics of the formation of ingots and castings when the heat from the liquid phase. Product denali impact assessment of the two-phase zone of warm screening ingots, electron trogidroimpulsno melt processing and the creation of the angular momenta in the liquid phase using a non-pressure filling glasses with offset output channels.

**Key words:** two-phase zone, external influences, filling the glasses, continuous casting, steel billets.