

А. А. Мочалов¹, С. В. Коваль², С. С. Коваль¹

*¹Украинский государственный морской технический университет
им. адмирала Макарова, г. Николаев*

*²Николаевский учебно-научный центр
Одесского национального университета им. И.И. Мечникова*

Анализ условий тепломассопереноса в области перестройки конвективного потока

Создана методика расчета процесса выделения твердой фазы в области перестройки конвективного потока двухфазной области и формирования восходящего потока в центральной области образца. Установлены зависимости температуры, концентрации и относительного количества твердой фазы от характеристик поступающей жидкой фазы. Проанализирован характер изменения исследуемых величин при изменении входных параметров в широком диапазоне.

Введение

Конвективное перемещение жидкого металла в изложнице относится к одному из важнейших факторов, влияющих на интенсивность теплопередачи от перегретых объемов жидкой фазы к границе затвердевания и скорость продвижения фронта затвердевания, распределение и сепарацию примесного компонента в объеме образца. Существующие модели [1,2] описывают процесс формирования твердой фазы с учетом естественной конвекции, однако не позволяют описать неоднородностей внутренней структуры, возникающей в нижней центральной области образца (области смешения). В процессе кристаллизации многокомпонентных сплавов в гидродинамическом пограничном слое формируется двухфазная область, в которой жидкая фаза обогащена ликвационными примесями, причем распределение этих примесей происходит неравномерно. Жидкий металл, находящийся в пограничном слое, в результате естественной конвекции стекает в нижнюю часть образца, температура и концентрация которого соответствует первоначальной.

Процесс смешения металла, поступающего из пограничного слоя в центральную область образца, происходит не во всей центральной области, а только в области перестройки потока. Размеры области смешения существенно зависят от геометрических размеров образца, глубины жидкой лунки, скорости охлаждения образца, физических параметров сплава и технологии его разлива. Целью данной работы является: создание физико-математической модели выделения твердой фазы в нижней центральной части образ-

ца; исследование влияние параметров конвективного потока двухфазной области на кристаллизации сплава в рассматриваемой области.

Теоретическая часть

Выделим в центральной части прямоугольного слитка с размерами $A \times B \times C$ область смешения, в которой происходит перестройка потока жидкого металла, формирование восходящего потока. Высота области смешения, принимаем порядка толщины теплового пограничного слоя в этой области [3]. Ввиду симметричности задачи все уравнения будем записывать для 1/4 части области смешения.

Концентрация примесного компонента в области смешения, является функцией температуры и времени, тогда изменение относительного объема твердой фазы запишется так:

$$\frac{d\varepsilon_{cm}'''}{d\tau} = (C_{(L)} - C_{(S)})^{-2} \times \left[(C_{(S)} - C_{(L)}) \frac{dC_{cm}'''}{d\tau} + (C_{(L)} - C_{cm}''') \frac{dC_{(S)}}{d\tau} + (C_{cm}''' - C_{(S)}) \frac{dC_{(L)}}{d\tau} \right], \quad (1)$$

где $C_{(L)}$, $C_{(S)}$ — Концентрация примесного компонента при данной температуре на линии ликвидус и солидус соответственно (определяемая по фазовой диаграмме равновесия сплава), C_{cm}''' , ε_{cm}''' — концентрация примеси в жидкой фазе на выходе из области смешения и относительное количество твердой фазы в ней.

Изменения концентрации в единицу времени, согласно закону сохранения массы, равно разности массовых расходов вдоль координатных осей выделенного элемента, умноженных на соответствующие концентрации жидкого металла. Тогда уравнение изменения концентрации примеси в жидком металле, в области смешения, со временем, запишется так:

$$C_{cm}' \bar{v}_{nc} \delta_T z_T \bar{\rho}_{ijk}'' - C_{cm}' \bar{v}_6 f_6 \bar{\rho}_{ijk}'' = \frac{d(M_{cm}^{\text{ж}} C_{cm}')}{d\tau}, \quad (2)$$

где C_{cm}' , — концентрация примеси в жидком металле на входе в область смешения; $M_{cm}^{\text{ж}}$ — масса жидкого металла в области смешения;

$\bar{v}_{nc} = \frac{1}{\delta_T} \int_0^{\delta_T} v_{(x)}'' dy = \frac{\sum_{j=1}^n v_{(x)ijk}'' \Delta y}{\delta_T}$ — среднерасходная скорость жидкого металла двухфазной области слитка; δ_T — толщина теплового пограничного слоя;

z_T — ширина теплового пограничного слоя; $\bar{v}_e$ — среднерасходная скорость восходящего потока жидкого металла в центральной области; f_e — сечение потока на выходе из области смешения; $\bar{\rho}_{ijk}^{'\prime\prime}$ — плотность жидкого металла.

Используя уравнение неразрывности, введем характеристический коэффициент χ_S , позволяющий объяснить и проанализировать процесс формирования седиментационного конуса.

$$\bar{v}_{nc} f_{nc} = \bar{v}_e f_e, \quad \chi_S = \frac{0,5A - \delta_{3A} + 0,5B - \delta_{3B} - \delta_T}{(0,5A - \delta_{3A})(0,5B - \delta_{3B})} \bar{v}_{nc}, \quad (3)$$

где δ_{3A} — толщина затвердевшего металла со стороны A ; δ_{3B} — толщина затвердевшего металла со стороны B ; f_{nc} — площадь сечения потока на входе в область смешения.

Преобразуем уравнение (2) с учетом уравнений (1) и (3)

$$\chi_S (C'_{cm} - C_{cm}^{'\prime\prime}) = \frac{dC_{cm}^{'\prime\prime}}{d\tau} \frac{C'_{cm} - C_{(S)cm}}{C_{(L)cm} - C_{(S)cm}} - C_{cm}^{'\prime\prime} \frac{d\varepsilon_{cm}}{d\tau}. \quad (4)$$

Для расчета нестационарного температурного поля в области смешения образца, применяя закон сохранения энергии, запишем уравнение изменения энтальпии для рассматриваемой области:

$$M_{cm} c^{\mathcal{K}} \frac{dT_{cm}^{'\prime\prime}}{d\tau} = c^{\mathcal{K}} \bar{v}_{nc} f_{nc} \bar{\rho}_{ijk}^{'\prime\prime} T_{cm}^{'\prime\prime} - c^{\mathcal{K}} \bar{v}_e f_e \bar{\rho}_{ijk}^{'\prime\prime} T_{cm}^{'\prime\prime} + r M_{cm} \frac{d\varepsilon_{cm}}{d\tau}, \quad (5)$$

где $c^{\mathcal{K}}$ — удельная теплоемкость жидкой фазы; $T_{cm}^{'\prime\prime}$, $T_{cm}^{'\prime\prime}$ — температура жидкого металла на входе и на выходе из области смешения; r — скрытая теплота фазового перехода.

Для того чтобы замкнуть систему уравнений (1), (2) и (5) дополним ее начальными и граничными условиями:

$$\text{начальные } T_{cm}^{'\prime\prime} \Big|_{\tau=0} = T_0, \quad C_{cm}^{'\prime\prime} \Big|_{\tau=0} = C_0, \quad \varepsilon_{cm} = 0;$$

$$\text{граничные } C'_{cm} = \bar{C}_{nc} = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ijk}^{'\prime\prime} m_{(x)ijk}}{\sum_{j=1}^n m_{(x)ijk}}, \quad T'_{cm} = \bar{T}_{nc} = \frac{\sum_{j=1}^n T_{ijk}^{'\prime\prime} m_{(x)ijk}}{\sum_{j=1}^n m_{(x)ijk}}$$

где $\bar{C}_{nc}$ — среднерасходная концентрация жидкого металла двухфазной области на входе в область смешения; $m_{(x)ijk}$ — расход жидкого металла через

элемент двухфазной области; $\bar{T}_{nc}$ — среднерасходная температура жидкого металла двухфазной области на входе в область смешения.

Обсуждение результатов

В работе [4] описана математическая модель кристаллизации сплава в двухфазной области. Компьютерный эксперимент на базе данной модели позволил определить распределение температуры и концентрации по сечению нисходящего потока жидкой фазы. Эксперимент проведен для железо-углеродистого сплава марки AISI_1008 (Fe — 99,4%; C — 0,08%).

Эксперимент на основе представленной в данной работе модели позволил проанализировать влияние характеристик входящего конвективного потока на процесс выделения твердой фазы в области смешения. Начальные условия для рассматриваемой области: $T'_{cm0} = 1809\text{ K}$; $C'_{cm0} = 0,08\%$.

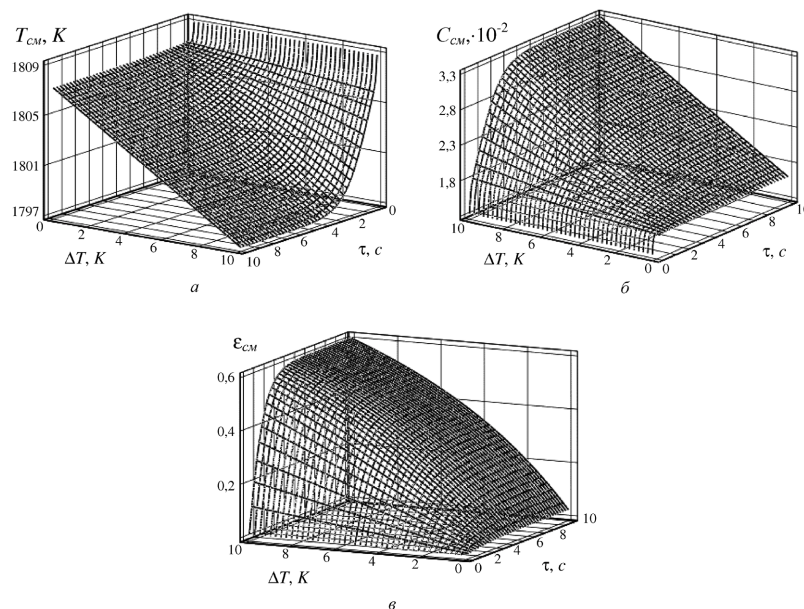


Рис. 1. Зависимость температуры (а), концентрации (б) и относительного количества твердой фазы (в) в нижней центральной области образца от величины переохлаждения конвективного потока двухфазной области (ΔT).
(Сплав AISI_1008, $T_0 = 1810\text{ K}$, $C_0 = 0,08\%$, $\chi_s = 15$)

На рисунке 1 представлены результаты исследования влияния величины переохлаждения конвективного потока двухфазной области (ΔT) на процесс выделения твердой фазы в области смешения образца. Видно, что с увеличе-

нием величины ΔT уменьшается температура области смешения (рис. 1.а), а концентрация выделившейся твердой фазы возрастает (рис. 1.б), не достигая однако значения первоначального жидкого расплава (явление отрицательной ликвации). Наблюдается линейная зависимость $T_{см}$ и $C_{см}$ от ΔT . Зависимость относительного количества твердой фазы выделившейся в начальной стадии переходного процесса от переохлаждения линейна (рис. 1.в). Затем характер зависимости изменяется, что обусловлено аккумулятивными свойствами выделившейся твердой фазы. Изменение величины ΔT приводит к изменению времени переходного процесса.

Введенный характеристический коэффициент χ_s зависит от геометрических размеров образца, толщины теплового пограничного слоя, толщины затвердевшей фазы и характеристик нисходящего конвективного гидродинамического потока. На рис. 2 представлены результаты численного исследования влияния величины χ_s на температуру и концентрацию твердой фазы в области смешения. Видно, что при увеличении χ_s происходит интенсификация охлаждения области смешения, однако конечные значения температуры (рис 2.а) и концентрации (рис 2.б) не изменяются.

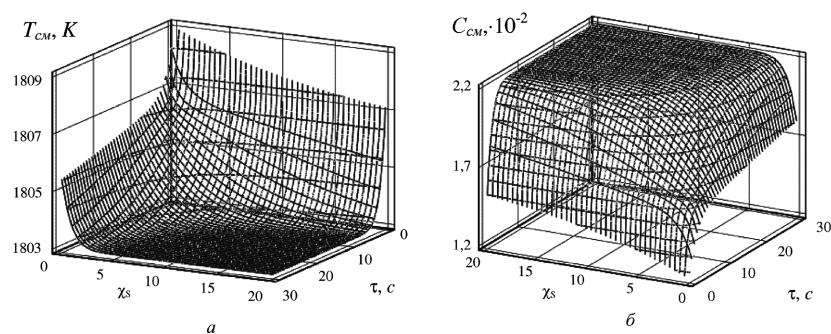


Рис. 2. Зависимость температуры (а) и концентрации (б) в нижней центральной области образца от величины характеристического коэффициента (χ_s). (Сплав AISI_1008, $T_0=1810\text{ K}$, $C_0=0,08\%$, $\Delta T=4\text{ K}$)

Анализируя влияние параметров конвективного потока жидкой фазы двухфазной области на тепломассоперенос в нижней центральной области образца можно утверждать, что неравновесное выделение твердой фазы в области смешения оказывает существенное влияние на кинетику фазового перехода во всем образце. Использование полученных результатов при моделировании процессов формирования внутренней структуры литых изделий позволит прогнозировать появление неоднородностей твердой фазы, возникающих на этапе первичной кристаллизации.

Литература

1. Kamal A. R. Ismail, Maria das Graças E. da Silva Numerical solution of the phase change problem around a horizontal cylinder in the presence of natural convection in the melt region // International Journal of Heat and Mass Transfer. — Vol. 46, May 2003. — P. 1791-1799.
2. Rafii-Tabar H., Chirazi A. Multi-scale computational modelling of solidification phenomena // Physics Reports. — 2002. — Vol. 365, №3. — P.145-249.
3. Мочалов А.А., Коваль С.С. Исследование влияния параметров двухфазной зоны на кристаллизацию металла в зоне смешения слитка // Збірник наукових праць УДМТУ. — 2000. — №5 (371). — С.114-120.
4. Мочалов О.О., Коваль С.В., Коваль С.С. Математичне моделювання фазових переходів в металевих конденсованих системах // Металофізика та новітні технології. — 2002. — Т. 24, №12. — С. 1715–1720.

О. О. Мочалов, С. В. Коваль, С. С. Коваль

Аналіз умов тепломасопереносу в області перебудови конвективного потоку

АНОТАЦІЯ

Створена методика розрахунку процесу виділення твердої фази в області перебудови конвективного потоку двохфазної області і формування висхідного потоку в центральній області зразку. Встановлені залежності температури, концентрації та відносної кількості твердої фази від характеристик низхідного потоку рідкої фази. Проаналізований характер змін дослідних величин при зміні вхідних параметрів в широкому діапазоні.

Mochalov A. A., Koval S. V., Koval S. S.

The analysis of conditions of heat and mass transfer in convection flow rebuild region

SUMMARY

The calculation methodic of solidification process in convection flow rebuild region of double phase region and formation of the upward flow in central region of casting is developed. The dependencies of the temperature, concentration and relative quantity of solid phase on the characteristic of an acting liquid phase is determined. The character of researched value changing during variation of entrance parameters is analyzed.