

С. С. БРОДСКИЙ, В. Ю. БОЛОТОВ,
И. А. ПАВЛЮЧЕНКОВ, Г. Н. ЧЕРНОМАЗ,
С. М. ХЕЙЛИК, Днепропетровский металлургический комбинат, Днепропетровский государственный технический университет, Национальная Металлургическая академия Украины

The article gives solution to the 3-D problem of hydrodynamics and heat transfer in the process of filling the intermediate ladle of the continuous billet casting machine.

УДК 621.746

ТРЕХМЕРНАЯ ЗАДАЧА ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША ШЕСТИРУЧЬЕВОЙ МНЛЗ ДНЕПРОВСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

В зарубежной и отечественной металлургической практике получила широкое распространение комплексная технология непрерывной разливки стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В конвертерном цехе Днепропетровского металлургического комбината введено в эксплуатацию отделение разливки стали непрерывным способом с двумя радиальными шестиручьевыми машинами с базовым радиусом машины 14 м. Переход на такую технологию позволяет снизить материалоемкость и энергоемкость производства, улучшить экологию. Однако следует учитывать, что такая технология выдвигает перед металлургами жесткие требования к выплавляемой стали по химическому составу и температуре. В связи с этим значительный теоретический и практический интерес представляет изучение процессов гидродинамики и теплопередачи в ковшевой ванне путем математического моделирования.

Задачи исследования гидродинамики и теплового состояния промежуточного ковша МНЛЗ ДМК решались ранее численно [1, 2]. Однако необходимо принимать во внимание, что в этих работах указанные задачи рассматривались в двумерной постановке, что не позволяет в полной мере отразить реальность физических процессов и не дает комплексного представления о картине течения и температуре жидкого металла. Для получения адекватной гидродинамической картины и распределения температур в объеме металл — футеровка возникает необходимость рассматривать указанные выше задачи в трехмерной постановке.

В настоящей работе рассмотрена трехмерная задача гидродинамики и теплопередачи в процессе заполнения шестиручьевого промежуточного ковша МНЛЗ Днепропетровского металлургического комбината. Основная цель исследования — определение зон твердой и жидкой фаз металла, температур металла и футеровки, а также скоростей металла в ковшевой ванне в период наполнения про-

межуточного ковша. Эти данные необходимы для использования в качестве начальных при расчете гидродинамики и теплопередачи в промежуточном ковше в стационарном режиме. Шестиручьевого промежуточный ковш МНЛЗ Днепропетровского металлургического комбината представляет собой футерованный желоб с размещенными в его днище стаканами-дозаторами и предназначен для отливки заготовок квадратного сечения размером 160×160 мм и блюмов размером 335×400 мм.

Металл в промежуточный ковш поступает из сталеразливочного ковша через разливочный стакан диаметром 70 мм. Следует отметить симметрию ковша при его продольном горизонтальном разрезе по оси разливочного стакана. При численном решении задачи рассматривается половина ковша, образуемая продольным горизонтальным сечением.

Схема ковша представлена на рис. 1.

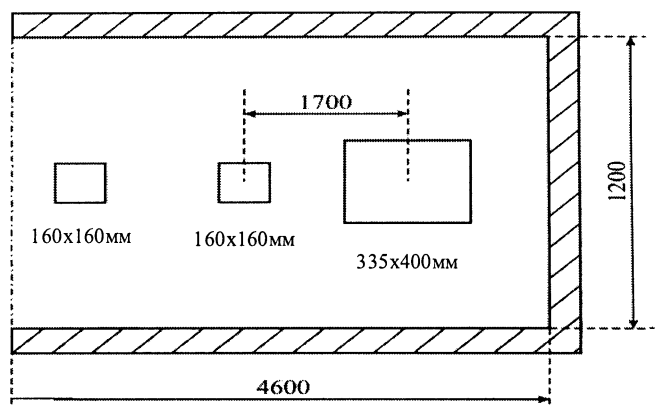


Рис. 1. Схема промежуточного ковша шестиручьевого МНЛЗ ДМК

Уровень металла в ковше по высоте разбивается на ряд слоев, при полном заполнении очередного слоя происходит заполнение следующего. В каждый конкретный

момент времени в расчете участвуют лишь те слои, которые полностью заполнены расплавом. При этом принимается допущение о том, что на свободной поверхности металла не протекают различные гидродинамические явления (разбрызгивание, волны), для описания которых необходимо привлекать довольно сложные численные методы. Для каждого слоя металла гидродинамическая картина в ковшевой ванне определяется методом счета на установление. При установлении течения рассчитывается задача теплопереноса в объеме металл — футеровка. При кристаллизации стали в отдельных областях форма расчетной области изменяется и пересчитывается гидродинамика в новой области. Данные, полученные в результате заполнения предыдущего слоя, принимаются начальными для заполнения следующего.

Нестационарная гидродинамика расплава описывается системой уравнений Навье — Стокса [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} P + \nu_3 \Delta \vec{V} + \vec{F}, \\ \text{div} \vec{V} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{V} = \{u, v, w\}$ — вектор скорости жидкости; P — давление; ρ — плотность; ν_3 — эффективный коэффициент кинематической вязкости, учитывающий турбулентный характер движения жидкости; \vec{F} — вектор массовых сил; ∇ — оператор Гамильтона; Δ — оператор Лапласа.

Система уравнений Навье — Стокса дополняется следующими граничными условиями:

на оси симметрии ковша — условие непротекания $\vec{V}_1 \cdot \vec{n} = 0$ и условие свободного скольжения $\nabla \vec{V}_1 \cdot \vec{n} = 0$;

на границе жидкий металл — твердая стенка — условие непротекания $\vec{V}_1 \cdot \vec{n} = 0$ и условие прилипания $\vec{V}_1 = 0$;

в месте входа струи в ковш — $\vec{V}_1 = V_0$, $\nabla \vec{V}_1 \cdot \vec{n} = 0$;

на свободной поверхности металла условие свободного скольжения $\nabla \vec{V}_1 \cdot \vec{n} = 0$ и известна скорость поднятия зеркала металла $\vec{V}_1 \cdot \vec{n} = V_z$.

Здесь через \vec{n} обозначен вектор внешней единичной нормали к поверхности. Нестационарное поле температур рассчитывается методом сквозного счета и описывается уравнением теплопереноса [3]:

$$\begin{aligned} c_3(T) \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + c_p (\vec{V} \cdot \nabla) T = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где τ — время; $\vec{V} = \{u, v, w\}$ — вектор скорости жидкости; T — температура жидкого металла; λ — коэффициент

теплопроводности; c — теплоемкость; ρ — плотность; $c_3(T)$ — эффективная теплоемкость, определяемая по формуле:

$$c_3(T) = \begin{cases} c, & T < T_S, \\ c + \frac{Q}{T_L - T_S}, & T_S \leq T \leq T_L, \\ c, & T > T_L. \end{cases}$$

Здесь Q — теплота плавления; T_L , T_S — соответственно температуры ликвидус и солидус.

По уравнению (2) проводится расчет теплопереноса в жидком металле, затвердевшей фазе ($\vec{V} = 0$) и в футеровке ($\vec{V} = 0$) при соответствующих значениях теплоемкости и теплопроводности.

Уравнение теплопроводности дополняется начальными и граничными условиями:

стенка до начала заполнения ковша имеет температуру $T_{0\text{ст}} = 1200$ °C;

в плоскости симметрии — условие симметрии $\nabla T \cdot \vec{n} = 0$;

на свободной поверхности металла осуществляется лучисто-конвективный теплообмен

$$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\text{св.пов}} = \alpha (T_{\text{ср}} - T_{\text{пов}}) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_{\text{ср}}^4 - T_{\text{пов}}^4),$$

где $T_{\text{ср}}$ — температура окружающей среды; α — коэффициент теплоотдачи от свободной поверхности жидкого металла; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент черноты поверхности расплава в ковше; σ — коэффициент Стефана — Больцмана;

на границе жидкий металл — твердая стенка условие идеального теплового контакта

$$T_{\text{мет}} = T_{\text{ст}}, \quad \lambda_m \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\text{мет}} = \lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\text{ст}};$$

на границе футеровка — окружающая среда условие конвективного теплообмена

$$-\lambda_{\text{фут}} \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\text{фут}} = \alpha (T_{\text{ср}} - T_{\text{фут}});$$

в месте входа струи в ковш $T = T_0$ — температура поступающего в ковш металла.

Для численного расчета описанной выше нестационарной задачи расчетная область разбивается на ячейки. Температура и давление определяются в центрах различных ячеек, компоненты вектора скорости — на соответствующих гранях.

Для решения системы уравнений гидродинамики применяется метод расщепления по физическим факторам Белоцерковского [3]. На первом этапе рассчитывается поле скорости без учета сил давления, на втором этапе

пересчитывается давление, на третьем этапе поле скорости подправляется с учетом сил давления.

Уравнение первого этапа схемы расщепления имеет вид

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nu_3 \Delta \vec{V} + \vec{F}. \quad (3)$$

Схема расщепления для уравнений (2), (3) в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} \frac{\partial u^m}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (u^m u^m) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} (v^m u^m) + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial Z} (w^m u^m) = \frac{\nu_3}{4} \left(\frac{\partial^2 u^m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u^m}{\partial Z^2} \right), \\ \frac{\partial v^m}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (u^m v^m) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} (v^m v^m) + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial Z} (w^m v^m) = \frac{\nu_3}{4} \left(\frac{\partial^2 v^m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v^m}{\partial Z^2} \right), \\ \frac{\partial w^m}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (u^m w^m) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} (v^m w^m) + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial Z} (w^m w^m) = \frac{\nu_3}{4} \left(\frac{\partial^2 w^m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w^m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w^m}{\partial Z^2} \right) - \frac{g}{4}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} c_3(T) \rho \frac{\partial T^m}{\partial \tau} + C_p \left[\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (u^m T^m) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} (v^m T^m) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial Z} (w^m T^m) \right] = \\ = \left(\frac{\partial^2 T^m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T^m}{\partial Z^2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где для $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ через u^m, v^m, w^m, T^m обозначаются вспомогательные расчетные шаги:

$$u^m = \begin{cases} \frac{u + |u|}{2} = u \text{ при } m = 1, 3, 6, 8, \\ \frac{u - |u|}{2} = u \text{ при } m = 2, 4, 5, 7, \end{cases}$$

$$v^m = \begin{cases} \frac{v + |v|}{2} = v \text{ при } m = 1, 4, 5, 8, \\ \frac{v - |v|}{2} = v \text{ при } m = 2, 3, 6, 7, \end{cases}$$

$$w^m = \begin{cases} \frac{w + |w|}{2} = w \text{ при } m = 1, 3, 5, 7, \\ \frac{w - |w|}{2} = w \text{ при } m = 2, 4, 6, 8. \end{cases}$$

Начальные условия для уравнений (4), (5) при пересчете с временного слоя τ^n на слой τ^{n+1} следующие:

$$T^1, u^1, v^1, w^1 \Big|_{\tau = \tau^n} = T, u, v, w \Big|_{\tau = \tau^n},$$

$$T^{i+1}, u^{i+1}, v^{i+1}, w^{i+1} \Big|_{\tau = \tau^n} = T^i, u^i, v^i, w^i \Big|_{\tau = \tau^{n+i/8}},$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.$$

При такой записи схемы расщепления на каждом шаге возмущения распространяются из одного из углов расчетной области, что позволяет построить неявную абсолютно устойчивую схему типа "бегущего счета" [4].

Схема расчетной области представлена на рис. 2.

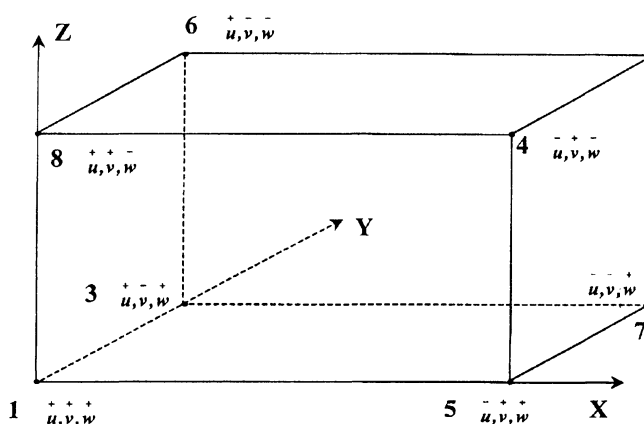


Рис.2. Расчетная область задачи

Для численного решения уравнения Пуассона для расчета поля давления на втором этапе схемы Белоцерковского вводится фиктивное время и на каждом расчетном шаге давление отыскивается методом установления по фиктивному времени.

В уравнениях (4), (5) используются односторонние аппроксимации конвективных производных на верхнем расчетном слое и центрально-разностная аппроксимация диффузионных слагаемых на различных расчетных слоях:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}^m - \vec{V}^{m-1}}{\Delta \tau} + \frac{1}{2} \Lambda_x^m \vec{V}^m + \frac{1}{2} \Lambda_y^m \vec{V}^m + \frac{1}{2} \Lambda_z^m \vec{V}^m = \frac{\nu_3}{4} \times \\ \times \left[\frac{P_x^m \vec{V}^m - L_x^m \vec{V}^m}{\Delta x} + \frac{P_y^m \vec{V}^m - L_y^m \vec{V}^m}{\Delta y} + \frac{P_z^m \vec{V}^m - L_z^m \vec{V}^m}{\Delta z} \right] - \frac{\vec{F}}{4}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{T^m - T^{m-1}}{\Delta \tau} + \frac{c}{c_3} \left[\frac{1}{2} \Lambda_x^m T^m + \frac{1}{2} \Lambda_y^m T^m + \frac{1}{2} \Lambda_z^m T^m \right] = \frac{1}{4c_3 \rho} \times \\ \times \left[\frac{P_x^m T^m - L_x^m T^m}{\Delta x} + \frac{P_y^m T^m - L_y^m T^m}{\Delta y} + \frac{P_z^m T^m - L_z^m T^m}{\Delta z} \right], \end{aligned}$$

где $\Lambda_x^m \vec{V}^m, \Lambda_y^m \vec{V}^m, \Lambda_z^m \vec{V}^m$ — односторонние разделенные разности, вычисляемые на верхнем временном слое [4], например,

$$\Lambda_x^1 w^1 = \frac{+u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} + w^1_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - u_{i-1,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} + w^1_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}{\Delta x}$$

$$\Lambda_x^2 w^2 = \frac{-u_{i+1,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} + w^2_{i+\frac{3}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - u_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} + w^2_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}{\Delta x}$$

$P_x^m \bar{v}^m$, $L_x^m \bar{v}^m$, $P_y^m \bar{v}^m$, $L_y^m \bar{v}^m$, $P_z^m \bar{v}^m$, $L_z^m \bar{v}^m$ — центральные разделенные разности, аппроксимирующие первые производные на соответствующих правых и левых гранях разностных ячеек, которые определяются на различных временных слоях:

$$P_x^m \bar{v}^m = (\bar{v}^l_{i+\frac{3}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - \bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}) / \Delta x,$$

$$P_y^m \bar{v}^m = (\bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{3}{2},k+\frac{1}{2}} - \bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}) / \Delta y,$$

$$L_x^m \bar{v}^m = (\bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - \bar{v}^l_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}) / \Delta x,$$

$$L_y^m \bar{v}^m = (\bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - \bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}) / \Delta y,$$

$$P_z^m \bar{v}^m = (\bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{3}{2}} - \bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}) / \Delta z,$$

$$L_z^m \bar{v}^m = (\bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - \bar{v}^l_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}) / \Delta z.$$

Если соответствующая компонента вектора скорости $\bar{v}^m \geq 0$, то в операторе P_x^m используются значения компонент вектора скорости на нижнем, а в операторе L_x^m — на верхнем расчетном слое. Если соответствующая компонента вектора скорости $\bar{v}^m \leq 0$, то наоборот: в операторе P_x^m используются значения компонент вектора скорости на верхнем, а в операторе L_x^m — на нижнем расчетном слое.

Аналогично записываются разностные операторы и для температуры T .

Для учета турбулентного характера движения расплава вводится коэффициент эффективной вязкости, включающий в себя турбулентную и аппроксимационную составляющие.

На алгоритмическом языке ПАСКАЛЬ составлены программы и проведены численные расчеты гидродинамики и поля температур в промежуточном ковше в процессе его заполнения. При этом установлено, что к моменту наступления стационарного режима работы про-

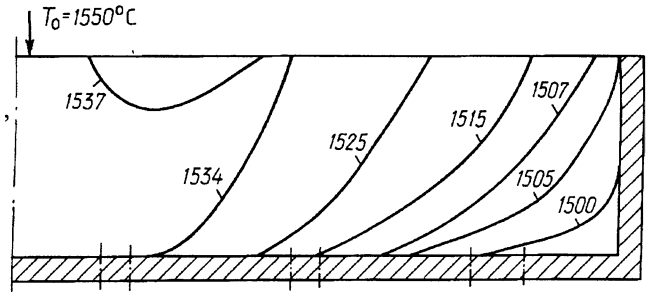


Рис.3. Изотермы в объеме промежуточного ковша в конце периода его заполнения



Рис.4. Поле скоростей в конце периода заполнения ковша, см/с

межуточного ковша твердая фаза металла в его объеме отсутствует, внутренняя поверхность футеровки приобретает температуру на 20 °С ниже, чем температура кристаллизации стали. Температура поступающего в ковш металла принималась 1550 °С, скорость поступления — 1 м/с. Габаритные размеры ковша, теплофизические параметры футеровки взяты из промышленных аналогов. Результаты расчета поля температур и гидродинамической картины в конце заполнения ковша представлены на рис. 3, 4. Температура футеровки ковша до начала заполнения принята 1200 °С.

Из результатов анализа численных расчетов следует, что прогрев футеровки ковша до начала его заполнения до температуры 1200 °С является достаточным для того, чтобы при выходе ковша на стационарный режим работы в его объеме не было твердой фазы металла. В последующих работах авторы предполагают провести исследование влияния начального прогрева футеровки ковша на гидродинамику расплава и тепловое состояние ковша в процессе его заполнения.

Литература

- Огурцов А. П., Величко А. Г., Исаев Е. И., Гресс А. В. Непрерывная разливка стали. Днепропетровск: ДГТУ, 1999.
- Бродский С. С. Новые технологические процессы и оборудование многоручьевых сортовых МНЛЗ. Мн.: Беларуская навука, 1998.
- Огурцов А. П., Самохвалов С. Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавильного производства. Киев: Наукова думка, 1993.
- Хрущ В. К. Попеременно-треугольная разностная схема для расчета течений вязкой несжимаемой жидкости и сопряженных задач теплообмена // Математические методы механики жидкости и газа. Днепропетровск: ДГУ, 1986.