

Математическая модель сопряженной двухэтапной задачи гидродинамики и теплопереноса при формировании биметаллического слитка Сообщение 1

ГОЛОВАЧЕВ А.Н.¹, СТОВПЧЕНКО А.П.¹, БОЛОТОВ В.Ю.², ПАВЛЮЧЕНКОВ И.А.²

Национальная металлургическая академия Украины¹,
Днепропетровский государственный технический университет²

Выполнено математическое моделирование процесса разлива и затвердевания двухслойных слитков по схеме «жидкий сэндвич». Математическая модель в форме сопряженной задачи гидродинамики и теплопереноса базируется на системе уравнений Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и дифференциальном уравнении теплопереноса. Численными расчетами найдены рациональные величины основных технологических параметров процесса, позволяющих обеспечить необходимую толщину наружного слоя – время выдержки первого расплава в изложнице перед добавлением второго, температуры разлива обоих расплавов, массовая скорость долива второго расплава.

Виконано математичне моделювання процесу розливання і твердіння двошарових злитків по схемі «рідкий сандвіч». Математична модель у формі зв'язаного завдання гідродинаміки і теплопереносу базується на системі рівнянь Нав'є–Стокса для в'язкої нестискуваної рідини і диференціальному рівнянню теплопереносу. Чисельними розрахунками знайдені раціональні значення основних технологічних параметрів процесу, що дозволяють забезпечити необхідну товщину зовнішнього шару – час витримки першого розплаву у виливниці, температури заливки обох розплавів, масова швидкість доливки другого розплаву.

Mathematic simulation of pouring process and solidification of two layer ingots by “liquid sandwich” technological root was carried out. Mathematic model in the shape of interconnected problem of hydrodynamic and heat transfer is based on system of equations of Navier-Stocks for viscous liquid and differential equation of heat transfer. By numerical experiments the rational values of main technological parameters were found that allow providing of necessary thickness of the internal layer - duration of first melt exposition into mold before second melt addition, temperature of both pouring melts and pouring mass speed of second melt.

Введение. Высокая стоимость легирующих элементов, входящих в основу быстрорежущих сталей, вызывает необходимость разработки и внедрения новых экономических материалов с сохранением уровня режущих свойств. Актуальным направлением, удовлетворяющим этим требованиям, является создание композитных материалов. Опробована технология получения биметаллического слитка «жидкий сэндвич» [1, 2], предусматривающая долив не затвердевшей сердцевины слитка из быстрорежущей стали конструкционной менее легированной сталью.

Отличительной особенностью получаемого биметаллического слитка является наличие двух слоев, образованных последовательной кристаллизацией исходной стали и стали с пониженным (за счет разбавления) содержанием легирующих элементов. Целенаправленное формирование слоев с различными свойствами дает возможность получать новые биметаллические материалы, однако ставит ряд вопросов, связанных с прогнозированием рациональных параметров их разлива для обеспечения заданной толщины первого слоя и полного смешения сталей во втором.

Для решения этих задач целесообразно использование методов математического моделирования. Математическая модель формирования слитков «жидкий сэндвич» предложена и разработана в работах [3, 4], однако авторы моделировали крупный листовой слиток, условия гидродинамики и теплопередачи для которого существенно отличны. Поэтому, нами выполнено моделирование в иной постановке задачи, суть и результаты которого приведены ниже.

Постановка задачи формирования слитка быстрорежущей стали. Рассматривали процессы сифонного заполнения изложницы расплавом быстрорежущей стали, начального этапа его затвердевания, последующей

доливки расплавом стали 40X сверху, и формирование образовавшегося композитного слитка в целом.

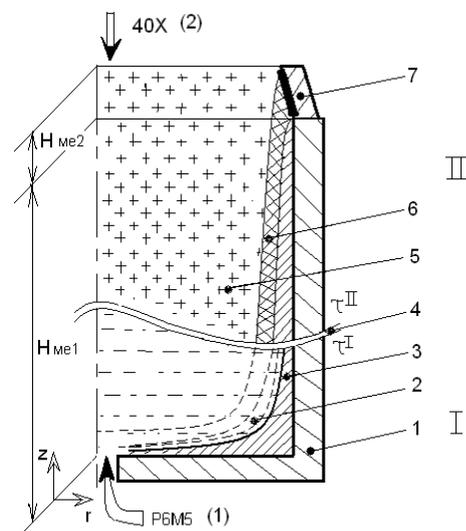


Рис. 1. Схема расчетной области двухэтапной математической модели формирования слитка «жидкий сэндвич»: 1 – стенка изложницы; 2 – жидкая сталь исходного состава (высота налива – H_{me1}), заливаемая сифоном; 3 – затвердевший слой $me1$; 4 – условная линия разрыва, схематически разделяющая этапы процесса (I и II); 5 – расплав, образованный смешиванием сталей исходной ($me1$) и доливаемой сверху ($me2$, высота налива H_{me2}); 6 – затвердевший слой стали смешанного состава; 7 – прибыльная надставка; τ' и τ'' – время первого и второго технологических этапов, соответственно.

В модели учитывали гидродинамику движения расплава и теплоперенос в ходе отливки и затвердевания двухслойного слитка. Поскольку наполнение изложницы первым расплавом и доливка вторым осуществляется разными технологическими способами (сифоном и сверху), математическую модель процесса получения слитка, разделили на два последовательных этапа:

1. Заполнение изложницы (рисунок 1) первой сталью (ме1) – учитывает процессы: заполнение изложницы сифоном через отверстие в ее центре; конвективное движение расплава под действием вынужденной и естественной конвекции; образование твердой корки ме1.

2. Долив изложницы второй сталью (ме2) – учитывает процессы: внедрения струи жидкого металла ме2, заливаемого в объеме прибыльной части (16 % общего объема слитка) сверху в центр зеркала ме1; конвективное движение и, одновременно, смешение двух металлов разного состава и, затем, затвердевание металла смешанного состава.

Основные уравнения и допущения математического описания задачи формирования слитка быстрорежущей стали. При составлении математического описания задачи заполнения, доливки и затвердевания слитка сделан ряд упрощающих допущений.

При определении геометрии расчетной области приняли, что изложница имеет форму цилиндра с приведенным эффективным радиусом, соответствующим реальному размеру слитка. Конусность изложницы и прибыльной надставки пренебрегли.

По гидродинамике движения расплава предположили, что:

-отсутствует инжекция воздуха расплавом, как при сифонной заливке, так и доливе сверху;

- зеркало металла является ровным, колебания его поверхности отсутствуют;

- граница жидкого металла подвижна, форма ее определяется толщиной растущей твердой корки металла.

Турбулентный характер движения расплава учтен введением коэффициента эффективной вязкости, который включает турбулентную и аппроксимационную составляющие.

В описании теплофизики процесса принято, что с поверхности изложницы и жидкого металла происходит отдача тепла как за счет конвективного теплообмена с заданным коэффициентом теплоотдачи, так и излучением с определенным коэффициентом черноты.

При моделировании заполнения изложницы, максимальный уровень расплава разбивали на ряд квазистационарных подуровней, на каждом из которых решается задача гидродинамики и теплопереноса с учетом на установление. Течение расплава в объеме изложницы на каждом квазистационарном подуровне описывается системой уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости при $\tau \rightarrow \infty$:

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

где P – давление, ρ – плотность расплава, ν_3 – эффективный коэффициент вязкости, учитывающий турбулентный характер движения жидкости, \vec{g} – вектор силы тяжести, $\vec{V} = \{V_r, V_z\}$ – вектор скорости металла.

При решении системы уравнений начальные значения всех величин, скоростей, кроме скорости входящей струи и зеркала металла, приняли равными нулю. Систему уравнений Навье-Стокса дополнили следующими граничными условиями:

- на границах раздела жидкий металл – затвердевшая корка/стенка/дно изложницы и на оси симметрии – условие непротекания $\vec{V} \cdot \vec{n} = 0$ и условие скольжения $\nabla \vec{V} \cdot \vec{n} = 0$.

- на свободной поверхности металла скорость поднятия зеркала металла – $V_{\text{зеркала}} = V_z$, выполняется условие свободного скольжения $\nabla V_r \cdot n = 0$.

При входе струи металла в изложницу задается величина скорости струи и выполняется условие свободного скольжения $V_r = 0$.

Расчет поля температур проведен методом сквозного счета по дифференциальному уравнению теплопереноса:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla(T\vec{V}) = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \Delta T \pm \frac{Q}{c \cdot \rho}, \quad (2)$$

где τ – время, T – температура жидкого металла, λ – коэффициент теплопроводности, c – теплоемкость, Q – теплота плавления/кристаллизации.

При решении уравнения теплопереноса задавали следующие граничные условия:

- на оси симметрии:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0; \quad (3)$$

- на свободной поверхности:

$$\begin{cases} q = -\alpha(T_m - T_{cp}) - E_{np} \cdot \sigma \cdot (T_m^4 - T_{cp}^4), \\ q = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases}, \quad (4)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, E_{np} – приведенная степень черноты;

- на твердой поверхности (Σ):

$$\begin{cases} q = -\alpha(T_m|_{\Sigma} - T|_{\Sigma}), \\ q = \lambda \frac{\partial T}{\partial \tau}|_{\Sigma} \end{cases}; \quad (5)$$

- на границе твердый металл – изложница (М–И) выполняется условие IV рода:

$$T_m|_{M-u} = T_u|_{M-u}, \quad (6)$$

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial n}|_{v-b} = \lambda u \cdot \frac{\partial T_u}{\partial n}|_{M-u}$$

где $T_m|_{M-u}$ и $T_u|_{M-u}$ – температуры металла и изложницы на границе раздела металл–изложница, соответственно.

Поставленную задачу решали методом расщепления по физическим факторам [5–7], применительно к процессу заполнения изложницы и кристаллизации двухслойного слитка быстрорежущей стали.

Математическая модель задачи формирования двухслойного слитка в указанной постановке реализована в виде программы на языке Паскаль.

Основные результаты численного решения задачи формирования слитка быстрорежущей стали в двухэтапной постановке. Численные расчеты выполнены для слитка ОАО Днепрспецсталь массой 3,6 т, высотой – 2365 мм, эффективным радиусом 270 мм, высотой тела слитка (до разъема прибыльной час-

ти) – 2055 мм. Теплофизические характеристики материалов изложницы, разливаемой стали, теплоизолирующих смесей принимали по известным справочным данным, а температуры заливаемых сталей брали в интервалах, рекомендуемых технологическими инструкциями по их разливке.

Для установления оптимальных параметров двухслойного композита варьировали температуру расплава, заливаемого в тело слитка и прибыль, а также время начала и массовую скорость долива.

Построенные поля скоростей позволили определить особенности движения расплава на обоих этапах формирования двухслойного слитка.

На первом этапе движение металла в процессе заполнения тела слитка инициируется струей, выходящей из сифонной проводки. С увеличением ферростатического давления столба наполняющей слиток стали, высота фонтанирующей струи уменьшается, что обеспечивает на уровнях близких к верху слитка практически ламинарный подъем зеркала металла. Такой характер движения расплава приводит к тому, что наиболее горячая и турбулизованная зона сосредоточена в нижней части слитка, что замедляет опережающую кристаллизацию донной части. К моменту долива вынужденная конвекция расплава практически затухает.

Долив прибыльной части (второй этап) слитка осуществляется сверху мощной струей, которая довольно быстро проникает до дна (менее 4, 16, 48 с, для массовых скоростей разливки 29, 14,5, 9,7 кг/с соответственно), а затем разворачивается в противоположном направлении, образуя в прилегающих к ней объемах турбулентные вихри, которые обеспечивают перемешивание двух расплавов.

Установлено, что численные расчеты с помощью математической модели в разработанной постановке задачи позволяют довольно точно определить толщину твердого слоя в каждый момент затвердевания слитка. Это позволило установить оптимальный момент начала долива второго расплава (8 ± 1 минута), при котором толщина твердого слоя составляет 24 – 30 % радиуса слитка и наиболее равномерна по всей высоте слитка ($15 \pm$ мм).

Разработанная двухэтапная модель формирования слитка с доливом может быть использована для прогнозирования процесса формирования композитов по технологии «жидкий сэндвич», что позволит создавать новые варианты композиционных высоколегированных сталей и обеспечить экономию дорогостоящих легирующих элементов при их изготовлении.

Выводы

Разработана двухэтапная математическая модель в форме сопряженной задачи гидродинамики и теплопереноса, описывающая процесс формирования композитного слитка по технологии «жидкий сэндвич».

Численные решения, выполненные применительно к композиционному сортовому слитку массой 3,6 т из быстрорежущей стали Р6М5, доливаемой конструкционной сталью 40Х в объеме прибыльной части, показали:

- удовлетворительную точность определения толщины затвердевшего слоя и, следовательно, возможность установления оптимального момента долива второго расплава;

- полное проникновение струи доливаемого расплава до твердого слоя стали, залитой ранее;

- интенсивное движение потоков металла в жидкой сердцевине слитка при доливе, что обеспечивает смешение двух расплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратенко В.М., Поляков С.Н., Дмитриев Ю.В. В Сб. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Днепропетровск: ИЧМ, Вып. 2.– 1998.– С. 370–377.
2. Головачев А.М., Лейбензон В.А., Кондратенко В.М., Стовпченко А.П. Металознавство та термічна обробка металів.–№2.–2005.–С.63–66.
3. Лейбензон В.А., Недопекин Ф.В., Кондратенко В.М. и др. Затвердевание металлических композиций: производство и моделирование.– Донецк: ООО «Юго-восток, Лтд»,– 2005.– 231 с.
4. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Мелихов В.М. и др. Материалы междуна. н.-г. конф. „Производство стали в XXI веке. Прогноз, процессы, технологии, экология”.–К.:НТТУ „КПИ”,.–С. 534–537.
5. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавильного производства.К.: Наукова думка, 1993.–218 с.
6. Огурцов А.П., Самохвалов С.С. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатofазних середовищах. К.:Наукова думка, 2001. – 409 с.
7. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Филиппов В.В. Стальной слиток. Т.2.– Минск: Белорусская наука, 2000.–640 с.