



The results are presented of mathematical simulation of forming of composite ingots with different formula and properties of external and internal levels. Limit parameters of solid plug thickness are determined

В. Ю. БОЛОТОВ, В. С. МИНАЕВА, И. А. ПАВЛЮЧЕНКОВ,
Днепродзержинский государственный технический университет,
А. П. СТОВПЧЕНКО, Национальная металлургическая академия Украины

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КОМПОЗИТНОГО СЛИТКА

УДК 669.18.046.5

Одной из основных задач современных промышленных технологий является увеличение прочности металла и уменьшения его потребления. Это диктует необходимость создания высокопрочных сталей для металлоконструкций. Известно, что работоспособность и срок службы большинства металлоизделий обеспечивается в первую очередь их рабочим слоем. Это обуславливает экономическую нецелесообразность использования монометаллов (определенную высокой стоимостью легирования и технической невозможностью сохранения служебных свойств изделия до полного износа ввиду потери конструктивной прочности). В связи с этим наиболее перспективно использование композитов в металлоизделиях, работающих в условиях абразивного, эрозийного и других видов износа, агрессивных сред. Поэтому разработаны и используются композитные материалы с различными составами и свойствами внутреннего и наружного слоев.

Одним из эффективных путей повышения качества и производительности сельскохозяйственных работ является использование композитных материалов с различными составами в качестве рабочих органов грунтообрабатывающих машин. Так, наилучшая стойкость отвалов плугов достигается при использовании металлического листа с мягким внутренним и двумя твердыми износостойкими наружными слоями. Такая комбинация сплавов позволяет обеспечить высокую стойкость против абразивного износа и знакопеременных динамических нагрузок.

Изготовление металлического листа можно осуществить путем отливки слитков с твердой вставкой и последующей прокаткой. Литейная технология не требует капитальных затрат и перенстройки действующего металлургического процесса. Конструирование таких материалов и оптимизация технологии производства значительно упрощаются с помощью методов математического моделирования. Для уточнения технологических параметров композитного слитка было проведено математическое моделирование процесса формиро-

вания композитных слитков (в частности, для получения композитных листов для отвалов плугов).

Схема расчетной области представлена на рисунке. При численном решении задачи рассматривается 1/4 часть слитка и изложницы.

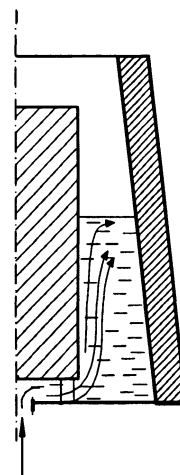


Схема расчетной области

Нестационарная гидродинамика металла при заполнении изложницы описывается системой уравнений Навье—Стокса [1]:

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

где $\vec{V} = \{u, v, w\}$ — вектор скорости; P — давление; ρ — плотность; ν_3 — кинематическая вязкость, учитывающая турбулентный характер движения жидкого металла; $\vec{F}$ — вектор массовых сил; ∇ — оператор Гамильтона; Δ — оператор Лапласа.

Система уравнений Навье—Стокса дополняется следующими граничными условиями:

- на осях симметрии — условие непротекания $\vec{V}_\perp \cdot \vec{n} = 0$ и условие свободного скольжения $\nabla_\perp \vec{V}_\parallel \cdot \vec{n} = 0$;

• на границе жидкий металл—твердая стенка — условие непротекания $\bar{V}_\perp \cdot \bar{n} = 0$ и условие прилипания $\bar{V}_{II} = 0$;

• в месте входа струи в изложницу — $\bar{V}_{II} = V_0$, $\nabla \bar{V}_{II} \cdot \bar{n} = 0$;

• на свободной поверхности металла условие свободного скольжения $\nabla \bar{V}_{II} \cdot \bar{n} = 0$ и известна скорость поднятия зеркала металла $\bar{V}_\perp \cdot \bar{n} = V_z$.

Здесь через $\bar{n}$ обозначен вектор внешней единичной нормали к поверхности. Нестационарное поле температур описывается уравнением теплопереноса [2]:

$$c_s(T) \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + c_p (\bar{V} \cdot \nabla) T = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где τ — время; T — температура жидкого металла; λ — коэффициент теплопроводности; c — теплоемкость; ρ — плотность; $c_s(T)$ — эффективная теплоемкость, определяемая по формуле [3]:

$$c_s(T) = \begin{cases} c & T < T_S, \\ c + \frac{Q}{T_L - T_S} & T_S \leq T \leq T_L, \\ c & T_L < T, \end{cases} \quad (3)$$

где Q — теплота фазового перехода в металле; T_L , T_S — соответственно температуры ликвидус и солидус.

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

Уравнение теплопроводности дополняется начальными и граничными условиями:

• вставка до начала заполнения изложницы имеет температуру $T_{\text{вст}}^* = 20^\circ\text{C}$;

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

• на свободной поверхности металла осуществляется лучисто-конвективный теплообмен [1]:

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

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—вставка условие идеального теплового контакта:

$$T_{\text{мет}} = T_{\text{вст}}^*, \quad \lambda_m \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{\text{мет}} = \lambda_{\text{вст}} \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{\text{вст}}.$$

На границе изложница — окружающая среда условие лучисто-конвективного теплообмена; в месте входа струи в ковш $T = T_0$ — температура поступающего в изложницу металла.

Для решения системы уравнений гидродинамики применяется метод расщепления по физическим факторам Белоцерковского [1]. При моделировании процессов гидродинамики и теплопереноса в процессе заполнения уровень металла по высоте изложницы разбивается на ряд слоев, при полном заполнении очередного слоя происходит заполнение следующего. В каждый конкретный момент времени в расчете принимают участие 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 рассчитывается методом счета на установление. 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.

На алгоритмическом языке ПАСКАЛЬ составлены программы и проведены численные расчеты гидродинамики и поля температур в изложнице и слитке с внутренним макрохолодильником. В табл. 1 приведены основные параметры слитка, вставки, изложницы и прибыльной надставки, для которых были выполнены численные расчеты.

Таблица 1. Исходные параметры для моделирования

Параметр	Слиток	Изложница	Прибыльная надставка	Вставка
Масса, т	13,0	14,1	1,24	3,1
Верхнее сечение, мм	1220×640		1070×490	1000 × (170–200)
Нижнее сечение, мм	1195×580		1170×590	
Высота, мм	2000	2200	560	1800–2000

Численные расчеты позволили найти предельные параметры толщины твердой вставки, обеспечивающей надежное соединение с матрицей слитка. Определены следующие пределы времени заполнения изложницы с композитной вставкой (время заполнения прибыльной надставки составляет 70%) (табл. 2).

Таблица 2. Пределы времени заполнения изложницы с композитной вставкой

Время наполнения, с	Массовая скорость наполнения слитка, т/мин (кг/с)	Линейная скорость наполнения, мм/мин (мм/с)
Минимум — 300	2,6 (43,3)	571 (9,52)
Максимум — 480	1,625 (27,1)	357 (5,95)

Литература

1. Огурцов А. П., Самохвалов С. Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавленного производства. Киев, 1993.

2. Никитенко Н. И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток. Киев, 1978.

3. Вихлевщук В. А., Огурцов А. П., Павлюченков И. А., Черномаз Г. Н. Математическое моделирование процессов внеагрегатной обработки стали. Днепропетровск, 1997.

НОВЫЕ ПОСТУПЛЕНИЯ

1. Немецко-русский металлургический словарь: В 2 т. / Б. С. Гуляницкий, А. П. Леонтьев, И. А. Леонтьев и др. М.: РУССО, 1999. 558 с. (177231 803.0 Н 50).

Словарь включает около 70 000 терминов по теории металлургических процессов, металлургической теплотехнике, черной, цветной и порошковой металлургии, металловедению, термообработке, прокатному и волочильному производствам, металлургии полупроводниковых материалов, охране окружающей среды и другим смежным с металлургией разделам. Содержит около 2000 сокращений.

Предназначен для широкого круга специалистов металлургического профиля и смежных отраслей, переводчиков, преподавателей и студентов.

2. Промышленные технологии: Печи и сушила машиностроительного и металлургического производства: Учеб. / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова и др.; Под общ. ред. А. П. Несенчука, В. И. Тимошпольского. Мн.: Выш. шк., 1999. 238 с. (175569 669.041 П 81).

Эта часть комплекса завершает классическое изложение материала, в основе которого лежит следующий фундаментальный принцип: теория, методы расчетов, схемы и конструкции. В основу конструктивного исполнения положены схемы современных нагревательных и термических печей прокатного и кузнечно-штамповочного производства.

Для научно-технических работников, а также для студентов и аспирантов энергетических, металлургических и машиностроительных специальностей вузов.

3. Металловедение и технология металлов: Учеб. для вузов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др. М.: Высш. шк., 2000. 638 с. (180847 669.017 М 34).

Рассматриваются вопросы физико-химического строения металлических и неметаллических материалов, термической обработки и поверхностного упрочнения, понятия о механических свойствах и методах их определения, основы теории и технологии получения заготовок литьем, давлением, сваркой и пайкой, механической обработкой, даны рекомендации по их применению.

4. Соколов Р. С. Химическая технология: Учеб. пособие для вузов: В 2 т. М.: Гуманитар.-изд. центр "Владос". Т. 2. Металлургические процессы. Переработка химического топлива. Производство органических веществ и полимерных материалов. 2000. 448 с. (180865 66.0 С59).

В книге рассмотрены металлургические процессы: производство черных и цветных металлов, производство и обработка стали. Даны сведения о производстве и переработке нефти, каменных углей и газообразных топлив. Значительное внимание уделено технологии производства и применения органических веществ, а также полимерных материалов.

(В скобках даны шифры хранения изданий в библиотеке).

Издания не продаются! Ознакомиться с изданием, а также заказать копии необходимых страниц можно в Республиканской научно-технической библиотеке по адресу: г. Минск, пр. Машерова, 7, читальный зал, к. 602, тел. 226-61-88.