



The calculation procedure of steel ingots hardening in molds during use of thermal insulation fillers and slag is worked out. The influence of parameters of the fillers and slag on the process of hardening in the ingot deadhead is investigated.

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПО "Платан" (Екатеринбург),
 В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Н. Л. МАНДЕЛЬ, О. Г. ХОПОВА, БГПА

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ВКЛАДЫШЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ

УДК 621.746

В последние годы расширяются масштабы разливки спокойной стали в уширенные книзу изложницы с утеплением прибыльной части слитков теплоизоляционными вкладышами [1, 2]. В связи с этим приобрела актуальность задача отыскания оптимальных размеров и теплофизических характеристик вкладышей методами математического моделирования.

Ниже приведен пример решения такой задачи для уширенного книзу стального слитка, отливаемого в изложницу без прибыльной надставки, при наличии в верхней части плоских теплоизолирующих вкладышей, а также слоя шлака на поверхности жидкого металла.

Математическое моделирование указанной задачи осуществляли по методике, описанной в работе [3].

Математическая формулировка задачи для стального слитка определена системой уравнений (1)–(9), а для вкладыша и слоя шлака — уравнениями (10), (11).

Уравнение теплопроводности для слитка:

$$c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial l} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial l} \right], \quad (1)$$

где

$$c(T) = \begin{cases} c_{\text{ТВ}} & \text{при } T < T_{\text{СОЛ}}, \\ c_{\text{ТВ}} - L \frac{\partial \psi}{\partial T} & \text{при } T_{\text{СОЛ}} \leq T \leq T_{\text{ЛИК}}, \\ c_{\text{Ж}} & \text{при } T > T_{\text{ЛИК}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_{\text{ТВ}} & \text{при } T < T_{\text{СОЛ}}, \\ (1 - \psi)(\lambda_{\text{Ж}} - \lambda_{\text{ТВ}}) + \lambda_{\text{ТВ}} & \text{при } T_{\text{СОЛ}} \leq T \leq T_{\text{ЛИК}}, \\ \lambda_{\text{Ж}} & \text{при } T > T_{\text{ЛИК}}; \end{cases} \quad (3)$$

$$T_{\text{СЛ.НАЧ}} = T_{\text{ОСИ}} - (T_{\text{ОСИ}} - T_{\text{СОЛ}}) \left[1 - \frac{l}{L} \right]^2. \quad (4)$$

Граничные условия (рис. 1):

1) при $\varphi = \varphi_{\text{ПОВ}}$ (поверхность слитка)

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial l} \Big|_{\text{ПОВ.СЛ}} = \frac{\lambda_{\text{ЗАЭ}}}{l_{\text{ЗАЭ}}} (T_{\text{СЛ}} - T_{\text{ИЗЛ}}) + \sigma_{\text{ЗАЭ}} (T_{\text{СЛ}}^4 - T_{\text{ИЗЛ}}^4); \quad (5)$$

на внешней поверхности изложницы

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial l} \Big|_{\text{ПОВ.ИЗЛ}} = \alpha_{\text{К}} (T_{\text{ИЗЛ}} - T_{\text{СР}}) + \sigma_{\text{ИЗЛ}} (T_{\text{ИЗЛ}}^4 - T_{\text{СР}}^4); \quad (6)$$

2) при $r = R_1$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_{\text{пов.сл}} - T_{\text{изл}}); \quad (7)$$

3) при $r=R_2$

$$\left| \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\text{сл}} = \left| \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\text{изл}}; \quad (8)$$

4) при $\varphi=0$ (ось слитка)

$$\frac{\partial T}{\partial l} = 0 \text{ (условие симметрии)}. \quad (9)$$

Уравнение теплопроводности для вкладыша и слоя шлака

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a(\tau) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \tau^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} \right) + \frac{q_{\text{ист}}(\tau)}{c(\tau)\rho(\tau)}, \quad (10)$$

где $q_{\text{ист}}(\tau) = q_0 f(\tau)$; $f(\tau) = \frac{\tau}{\tau_k} e^{-k \frac{\tau}{\tau_k}}$; $a(\tau) = \frac{\lambda(\tau)}{c(\tau)\rho(\tau)}$;

$$\lambda(\tau) = \lambda_{\text{кон}} + (\lambda_{\text{нач}} - \lambda_{\text{кон}}) \left(1 - \frac{\tau}{\tau_k} \right); \quad c(\tau)\rho(\tau) = (c\rho)_{\text{кон}} + [(c\rho)_{\text{нач}} - (c\rho)_{\text{кон}}] \left(1 - \frac{\tau}{\tau_k} \right).$$

Начальное распределение температуры принято равномерным по сечению вкладыша, а по высоте и толщине стенки изложницы находим по формуле:

$$T_{\text{нач.изл}} = T_{\text{внут.пов}} - (T_{\text{внут.пов}} - T_{\text{внеш.пов}}) \left[1 - \left(\frac{l}{L} \right)^n \right], \quad (11)$$

где $T_{\text{внут.пов}} = T_{\text{верх}} - (T_{\text{верх}} - T_{\text{ниж}}) \left(1 - \frac{r}{R} \right)$;

$$T_{\text{внеш.пов}} = T'_{\text{верх}} - (T'_{\text{верх}} - T'_{\text{ниж}}) \left(1 - \frac{r}{R} \right).$$

Решение задачи осуществляли методом сеток с использованием ЭВМ. При этом сечение слитка разделяли сеточной областью на 10 слоев по высоте и 20 слоев по ширине, а непрерывное течение процесса затвердевания слитка во времени разделяли на интервалы, которые определяли по формуле:

$$\Delta \tau = \frac{h_{\text{min}}^2}{4a_{\text{max}}}.$$

Здесь h_{min} — наименьший шаг сеточной области всей системы*.

Используя математическую модель, изучали влияние на процесс затвердевания слитка таких факторов, как геометрические размеры, теплопроводность материалов вкладыша и шлака, а также интенсивность тепловыделения в них за счет экзотермических добавок.

А. Влияние толщины и высоты вкладыша

Проведем расчетный анализ процесса затвердевания слитка при толщине вкладыша 10, 15, 30, 60 мм и коэффициенте теплопроводности $\lambda_{\text{вкл}} = 0,325 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

*Более детально методика решения задачи и система обозначений представлены в работе [4].

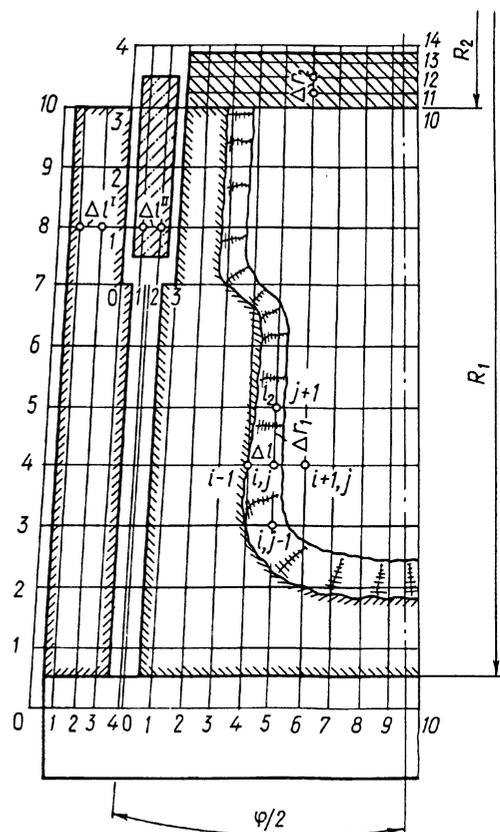


Рис. 1. Схема сеточных областей для расчета затвердевания слитка в изложницах с применением теплоизолирующих вкладыша и шлака

Результаты расчетов показаны на рис. 2 и 3, а, где представлены изотермы переходной твердо-жидкой зоны слитка для нескольких моментов времени и скорость нарастания твердой корки металла на расстоянии 300 мм от верха слитка в зависимости от толщины вкладыша. Как видно из рисунка, увеличение толщины вкладыша до 30 мм приводит к определенному замедлению скорости роста твердой корки слитка в зоне вкладыша; дальнейшее увеличение толщины вкладыша заметного влияния не оказывает. Рост высоты вкладыша от 400 до 800 мм существенно замедляет скорость кристаллизации верхней половины слитка (полная продолжительность затвердевания увеличивается от 4 до 5,5 ч) и в то же время приводит к благоприятным условиям питания жидким металлом усадочных зон в нижней части слитка.

Б. Влияние теплопроводности вкладыша

Исследовали затвердевание слитка высотой 2 м и толщиной 600 мм при вкладыше высотой 400 мм и толщиной 30 мм и коэффициенте теплопроводности $\lambda_{\text{вкл}} = 0,12; 0,17; 0,325$ и $0,58$ Вт/(м·К). Результаты расчетов представлены на рис. 3, б и 4. Как видно из рисунков, уменьшение коэффициента теплопроводности материала вкладыша с 0,58 до 0,325 Вт/(м·К) не оказывает существенного влияния на скорость нарастания твердой фазы в зоне вкладыша, которое наблюдается лишь при $\lambda_{\text{вкл}} = 0,12-0,17$ Вт/(м·К).

В. Влияние тепловыделения во вкладыше и шлаке

Принималось, что выделение экзотермического тепла во вкладыше учитывается заданием удельной теплотворной способности смеси от 0 до 2100 кДж/кг [5].

Анализ показал, что выделение экзотермического тепла во вкладыше не оказывает заметного влияния на скорость затвердевания слитка, что можно объяснить превалирующим действием теплоизоляционных свойств вкладыша.

Наличие слоя шлака на открытой поверхности (зеркале) металла существенно замедляет теплоотдачу от расплава и улучшает условия формирования слитка. При этом выделение экзотермического тепла (в указанных пределах) не оказывает заметного влияния на скорость охлаждения головной части слитка при наличии слоя шлака достаточной толщины (100–150 мм).

При увеличении коэффициента теплопроводности шлака от 0,23 до 5,8 Вт/(м·К) наблюдается ускоренный рост корки в начальный период времени: если в первом случае "мост" в головной части слитка образуется через 1 ч 50 мин, то во втором — через 48 мин.

Выводы

1. Разработана методика расчета затвердевания стального слитка в изложнице при наличии теплоизолирующих вкладышей и шлака с использованием метода сеток и ЭВМ.
2. В результате расчетного анализа изучено влияние параметров вкладыша и шлака на ход затвердевания уширенного книзу слитка высотой 2 м и толщиной 600 мм (конусность 1,5%). Показано, что заметное влияние на ход затвердевания в головной части слитка оказывает увеличение толщины

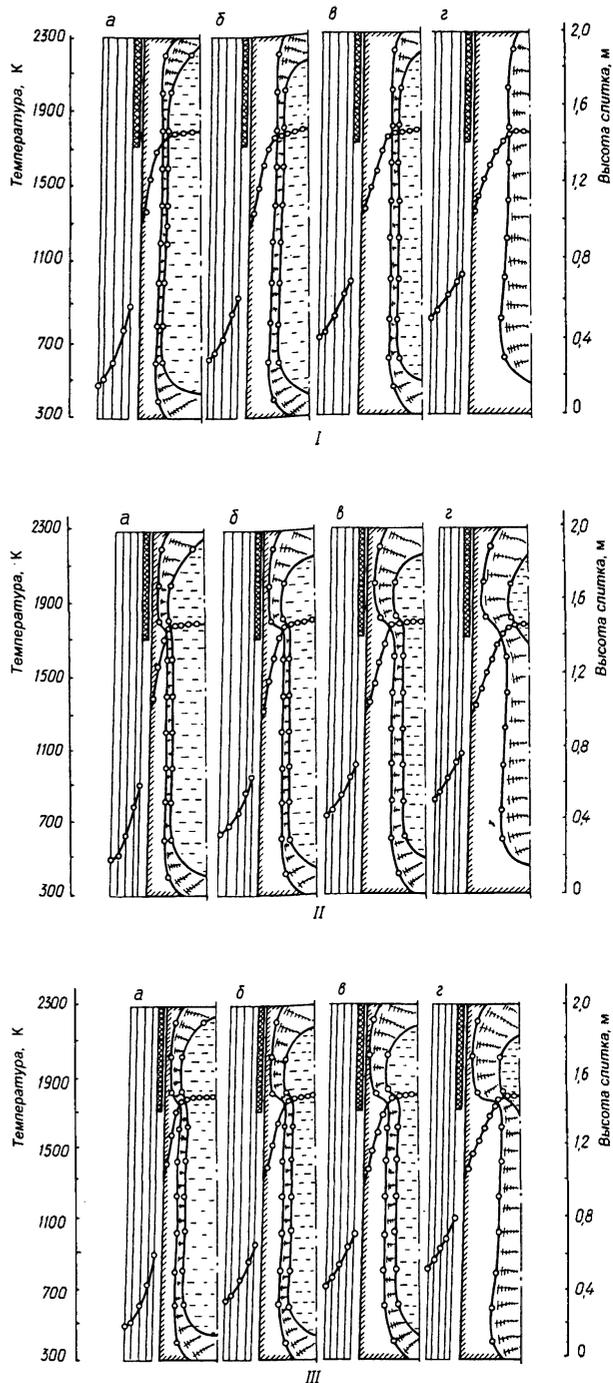


Рис. 2. Влияние толщины теплоизолирующего вкладыша на ход затвердевания стального слитка при $\lambda_{\text{вкл}} = 0,325$ Вт/(м·К), $h_{\text{вкл}} = 400$ мм: I — без вкладыша; II — при $l_{\text{вкл}} = 30$ мм; III — при $l_{\text{вкл}} = 80$ мм; а — при $\tau = 0,2$ ч; б — 0,2; в — 0,6; г — при $\tau = 1$ ч

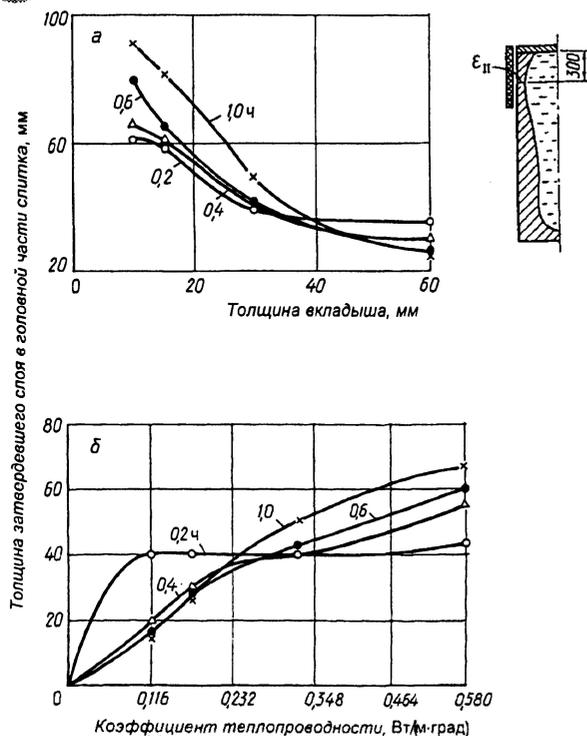


Рис. 3. Влияние толщины вкладыша (а) и теплопроводности материала (б) на скорость нарастания твердой фазы в головной части слитка

вкладыша до 30 мм и коэффициента теплопроводности материала вкладыша до $0,325 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Экзотермический эффект во вкладыше и шлаке оказывает меньшее влияние на скорость затвердевания ввиду их низкой теплопроводности.

Литература

1. Шнееров Я. А., Поляков В. Ф. Разработка и внедрение технологии разлива спокойной стали с применением теплоизоляционных вкладышей // Разливка стали и качество слитка. Киев, 1971.
2. Шнееров Я. А., Поляков В. Ф., Миневич В. Я. Особенности затвердевания уширенных снизу слитков спокойной стали при отливке их с теплоизоляционными вкладышами // Разливка стали в изложнице. М.: Металлургия, 1984.
3. Самойлович Ю. А. Расчет затвердевания слитков // Сб. тр. ВНИИМТ Металлургическая теплотехника. 1965. Вып. 12.
4. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Филиппов В. В. Стальной слиток. В 3 т. Т. 2. Затвердевание и охлаждение. Мн.: Беларуская навука, 2000.
5. Бакуменко С. П., Гуляев Б. Б. Снижение отходов стального слитка. М.: Металлургия, 1967.

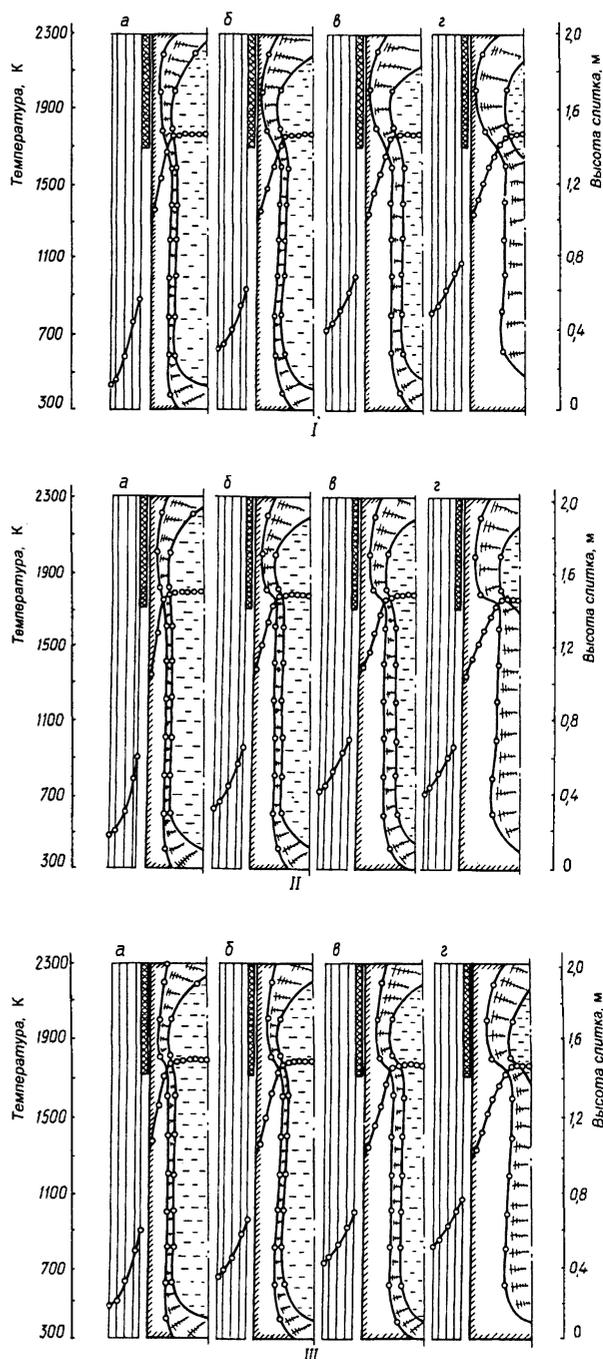


Рис. 4. Влияние теплопроводности материала вкладыша на ход затвердевания стального слитка при $l_{\text{вкл}} = 30 \text{ мм}$, $h_{\text{вкл}} = 400 \text{ мм}$: I — при $\lambda_{\text{вкл}} = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; II — $0,325$; III — при $\lambda_{\text{вкл}} = 0,58 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; а — при $\tau = 0,2$ ч; б — $0,2$; в — $0,6$; г — при $\tau = 1$ ч