



There is given the comparative analysis of solution of the problem of blooming ingot solidification in a casting mold by different methods for the purpose of determination of complete solidification duration.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, С. М. КОЗЛОВ, БНТУ,
Ю. С. ПОСТОЛЬНИК, ДГТУ,
В. А. ТРУСОВ, ДМК им. Ф.Э. Дзержинского,
Н. Л. МАНДЕЛЬ, Н. Г. МАЛЬКЕВИЧ, БНТУ

УДК 621.746

К ВОПРОСУ О ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ БЛЮМИНГОВОГО СЛИТКА В ЧУГУННОЙ ИЗЛОЖНИЦЕ

Предъявляемые в последнее время все более высокие требования к качеству слитков и отливок ставят вопрос об управлении процессом разливки на различных стадиях их формирования. Несмотря на значительное количество работ, посвященных этой тематике (например, [1–4]), проблема определения количественных и качественных закономерностей затвердевания слитка является достаточно актуальной.

В целом процесс формирования слитка в изложнице представляет собой совокупность процессов различной физической природы: заполнение формы жидким металлом, охлаждение и кристаллизация расплава, структурные и фазовые превращения металла, нагрев, охлаждение и термические деформации изложницы, образование дефектов слитка и др.

Сложность математического описания изучаемого процесса обусловлена следующими обстоятельствами: конечными размерами слитка и изложницы; сопряженностью задачи (наличием совместных граничных условий в зоне контакта слитка и изложницы); наличием фазового перехода в слитке в период его затвердевания (нелинейность задачи даже при постоянных теплофизических коэффициентах); существованием для реальных сплавов интервала температур, в котором выделяется теплота кристаллизации; зависимостью теплофизических характеристик от температуры; нелинейностью граничных условий на внешних поверхностях изложницы; возникновением температурных напряжений в слитке и изложнице; наличием обратного воздействия температурных деформаций металлической изложницы (образование газового зазора между слитком и изложницей) на температурные поля и теплообмен.

Вместе с тем при решении конкретных практических задач в процессе формирования слитков и отливок специалистам по тем или иным

причинам приходится сталкиваться с необходимостью оперативного решения поставленной задачи, что предполагает некоторые упрощения в постановочной части.

В данной работе приведен сравнительный анализ решения исходной задачи затвердевания с целью определения продолжительности затвердевания крупных промышленных слитков в изложницах при использовании различных подходов:

- численное решение опорной задачи;
- графоаналитический метод расчета процесса затвердевания;
- экспериментальное изучение процесса кристаллизации.

Сформулируем математическую модель для решения температурной задачи формирования стального слитка со снятой теплотой перегрева от начальной температуры затвердевания до его полной кристаллизации [5]. В процессе затвердевания слиток представим как двухслойное тело с различными условиями теплообмена на граничных поверхностях.

Процесс симметричной кристаллизации слитка описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{1}{(1-\xi)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[(1-\xi)^m \frac{\partial \Theta_j}{\partial \xi} \right] = K_a^{2-j} \frac{\partial \Theta_j}{\partial \tau}, \quad j = 1, 2, \quad (1)$$

при следующих граничных

$$\left. \frac{\partial \Theta_1}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = Bi_1 \Theta_1(0, \tau), \quad (2)$$

$$\Theta_j(\xi, \tau) \Big|_{\xi=l(\tau)} = 1, \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta_2}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} = 0, \quad (4)$$

и начальном условиях:

$$\Theta_{2(\xi,0)} = \varphi(\xi), \quad (5)$$

где введены температурные симплексы затвердевшей оболочки ($j = 1, 0 \leq \xi \leq l(\tau)$) и жидкой сердцевины ($j = 2, l(\tau) \leq \xi \leq 1$)

$$\Theta_1(\xi, \tau) = \frac{T_1(\xi, \tau) - T_c}{T_\phi - T_c}, \quad \Theta_2(\xi, \tau) = \frac{T_0 - T_2(\xi, \tau)}{T_0 - T_{лик}},$$

независимые переменные

$$\xi = \frac{r}{R}, \quad l(\tau) = \frac{L(t)}{R}, \quad \tau = Fo = \frac{a_2 t}{R^2}, \quad Bi_1 = \frac{\alpha_{заз} R}{\lambda_1},$$

$$Ko = \frac{q_\phi K_\gamma}{c_1(T_\phi - T_c)}$$

и числа

$$K_\gamma = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}, \quad K_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad K_a = \frac{a_2}{a_1}, \quad K_T = \frac{T_0 - T_{лик}}{T_\phi - T_c}.$$

Здесь приняты следующие обозначения: Θ, ξ, λ — соответственно безразмерные температура, координата и толщина твердой корки; Bi, Ko, Fo — критерии Био, Коссовича (затвердевания) и Фурье; m — коэффициент формы тела; T_c — температура окружающей среды; T_ϕ — температура затвердевания (солидуса); $T_{лик}$ — температура ликвидуса; T_0 — температура заливки; r — координата, отсчитываемая от внешней поверхности слитка; R — характерный размер тела; $L(t)$ — толщина твердой корки слитка; t — время; γ — плотность; λ — коэффициент теплопроводности; a — коэффициент температуропроводности; c — удельная теплоемкость; q_ϕ — скрытая теплота затвердевания; $\alpha_{заз}$ — коэффициент теплообмена между поверхностью слитка и изложницей. Индексы: 1 — твердая фаза; 2 — жидкая фаза.

По сечению слитка при изменении агрегатного состояния металла имеет место перемещение фронта кристаллизации $l(\tau)$ (границы раздела жидкой и твердой фаз), определяемое из условия:

$$K_a Ko \frac{dl(\tau)}{d\tau} = \sum_{j=1}^2 (K_\lambda K_T)^{j-1} \left. \frac{\partial \Theta_j}{\partial \xi} \right|_{\xi=l(\tau)}. \quad (6)$$

Предложенная математическая модель, как уже отмечалось, предназначена для расчета температурных полей затвердевания слитка базовой геометрической формы ($m = 0$ — пластина; $m = 1$ — цилиндр; $m = 2$ — шар) после снятия начального перегрева.

Получить распределение температуры в жидкой фазе металла в момент начала кристаллизации можно из выражения

$$\varphi(\xi) = 1 - \frac{Bi}{2K_T} [1 - (1 - \xi)^2].$$

Дифференциальное уравнение (1) решалось методом сеток с использованием явной разностной схемы. Разбивая половину поперечного сечения пластины на N слоев одинаковой толщины $\Delta \xi = 1/N$, заменяя непрерывное течение времени дискретным с шагом $\Delta \tau$, выполняя замещение частных производных конечными разностями

$$\frac{\partial \Theta_j}{\partial \xi} = \frac{\Theta_{i+1,k,j} - \Theta_{i-1,k,j}}{2\Delta \xi},$$

$$\frac{\partial^2 \Theta_j}{\partial \xi^2} = \frac{\Theta_{i+1,k,j} - 2\Theta_{i,k,j} + \Theta_{i-1,k,j}}{2\Delta \xi^2},$$

$$\frac{\partial \Theta_j}{\partial \tau} = \frac{\Theta_{i,k+1,j} - \Theta_{i,k,j}}{\Delta \tau},$$

имеем следующую расчетную схему:

$$\Theta_{i,k+1,j} = \Theta_{i,k,j} + \frac{\Delta \tau}{K_a^{2-j}} \left(\frac{\Theta_{i+1,k,j} - 2\Theta_{i,k,j} + \Theta_{i-1,k,j}}{2\Delta \xi^2} - \frac{m}{1 - \Delta \xi i} \frac{\Theta_{i+1,k,j} - \Theta_{i-1,k,j}}{2\Delta \xi} \right), \quad i = 1, \dots, N-1, \quad j = 1, 2. \quad (7)$$

Шаг по сечению слитка должен быть достаточно мелким, чтобы продвижение фронта кристаллизации попадало в узлы сетки. В противном случае необходимо говорить о построении сеточной модели с переменным шагом.

Для поверхностного слоя с учетом граничного условия (2) имеем

$$\Theta_{0,k+1,1} = \frac{\Theta_{1,k+1,1}}{Bi_1 \Delta \xi + 1}. \quad (8)$$

Для центрального слоя выражение (7) с учетом краевого условия (4) принимает вид

$$\Theta_{N,k+1,2} = \Theta_{N,k,2} + \Delta \tau (m+1) \frac{\Theta_{N-1,k,2} - \Theta_{N,k,2}}{\Delta \xi^2}. \quad (9)$$

Граничное условие (3) задает температуру по фронту кристаллизации, положение которого определяется с использованием (6). Продолжительность затвердевания слитка характеризуется моментом времени, когда фронт кристаллизации достигает оси симметрии слитка.

С помощью приведенного алгоритма (7)–(9) осуществлен расчет температурного поля и времени затвердевания 8-тонного алюминиевого слитка (сталь 45) поперечным сечением $0,736 \times 0,655$ м и высотой 2,8 м, кристаллизующегося в чугуновой изложнице с толщиной стенки 0,19 м. Исходные данные: температура заливки металла $T_0 = 1530^\circ\text{C}$, температура ликвидуса $T_{лик} = 1490^\circ\text{C}$, температура солидуса $T_{сол} = 1420^\circ\text{C}$, температура подогрева изложницы $T_{изл}^0 = 150^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $T_c = 30^\circ\text{C}$. Результаты расчета показали, что продолжительность полного затвердевания слитка составляет 2,69 ч.

Аналогичные расчеты по определению времени затвердевания исследуемого слитка проведены с применением графоаналитического метода, базирующегося на использовании "метода эквивалентных источников". Вывод аналитических формул и методика расчета подробно представлены в работах [5, 6], при этом для удобства практического использования расчетных формул составляющие компоненты приведены в графическом виде.

Продолжительность полного затвердевания слитка находим по формуле

$$\tau = \tau^* (1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (10)$$

где τ^* – время затвердевания слитка по решению Лейбензона; β_1 и β_2 – поправочные функции, учитывающие теплосодержание твердой и жидкой фаз (перегрев).

Поправочные функции β_1 и β_2 и величина τ^* определяются по графикам, приведенным на рис. 1, где $Po = \frac{q}{c_2(T_0 - T_{лик})}$ – критерий Постоляника.

Расчетное время затвердевания блюмингового слитка в соответствии с исходными данными, приведенными выше, составило 2,74 ч.

Как отмечалось в [4–8], для корректного и надежного математического моделирования высокотемпературных процессов необходимо наличие экспериментальных результатов, полученных непосредственно на объекте исследования, в производственных условиях, так как они несут первичную и наиболее качественную информацию о теплофизических процессах. Поэтому была разработана и реализована в условиях крупнейшего металлургического комбината им. Ф.Э. Дзержинского (г. Днепродзержинск, Украина) методика экспериментальных исследований теплового состояния крупных слитков.

Объектом исследования был блюминговый 8-тонный стальной слиток из осевой стали (по химическому составу близкой к стали 45) поперечным сечением 0,736 x 0,655 м и высотой 2,8 м, нагреваемый в регенеративных нагревательных колодцах и прокатываемый на блюминге 1150 Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского. Толщина стенки изложницы составляет 0,19 м.

Подробное описание объекта исследования и методики проведения промышленного эксперимента приведено в [4,7,8].

Результаты измерений температур поверхности и центральной части слитка, кристаллизующегося в интервале температур 1490–1420 °С, а также результаты численного моделирования приведены на рис. 2. Очевидно, что время полного затвердевания в соответствии с промышленными экспериментальными замерами составляет 2,75 ч, температура поверхности при этом равна 965–986 °С.

Продолжительность затвердевания слитка, найденная в результате численного моделирования

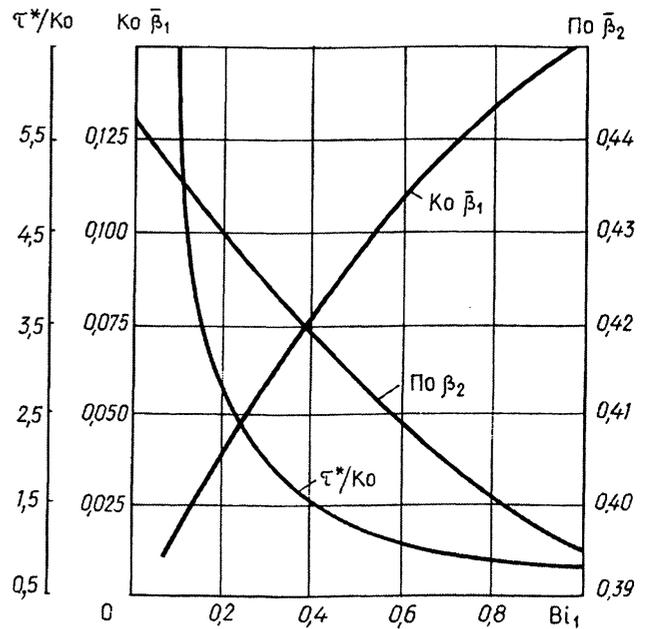


Рис. 1. Изменения τ^*/Ko , $Ko \beta_1$, $Po \beta_2$ в зависимости от величины критерия Bi_1

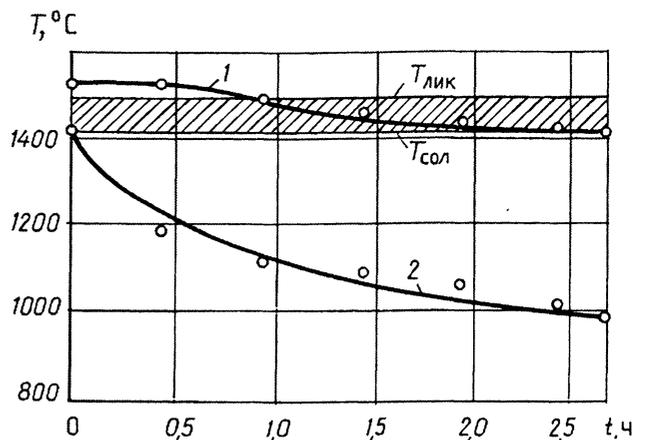


Рис. 2. Динамика затвердевания слитка: (1 – температура центра; 2 – температура поверхности); — — — результаты численного моделирования; ооо – промышленный эксперимент

процесса, составляет 2,69 ч, что несколько меньше времени затвердевания в промышленном эксперименте (2,75 ч). Это обусловлено тем, что принятая модель не учитывает времени снятия перегрева стали (~0,06 ч). Температура поверхности слитка равна 987 °С. Время полного затвердевания, найденное с использованием графоаналитического метода, составляло 2,74 ч.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующий вывод: несмотря на некоторые упрощения в части постановки задачи (отсутствие двухфазной зоны, учета времени снятия перегрева, невозможность явного анализа влияния величины газового зазора, толщины и материала изложницы на динамику температурных полей и др.), предлагаемые методики представляется возможным ис-

пользовать для анализа теплофизических процессов при затвердевании и охлаждении слитков и заготовок. Результаты расчетов могут быть использованы для последующего изучения возникающих термомодеформационных процессов.

Выводы

Проведен сравнительный анализ различных методов расчета продолжительности кристаллизации крупных стальных слитков в чугуновой изложнице. Показано, что для исследования и установления закономерностей процессов затвердевания и охлаждения слитков и заготовок целесообразен комплексный подход, включающий в себя использование инженерных методик, численных методов и проведение промышленных экспериментов.



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ МЕТАЛЛУРГОВ
КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ МСМ ПО КНИГОИЗДАНИЮ
"ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ"
предлагают книги
издательства "Интермет Инжиниринг"

Научная литература

1. Малоуглеродистые стали для металлических конструкций. ОДЕССКИЙ П. Д., ВЕДЯКОВ И. И. 1999.
2. Маркетинг в листопрокатном производстве. Книга 1. Проблемы разработки информационной системы предприятия. Колпаков С. С. и др. 1998.
3. Теория прокатки. ГРУДЕВ А. П. 2001.
4. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. АБРАИМОВ Н. В., ЕЛИСЕЕВ Ю. С. 2001.

Производственно-практическая литература

1. Производство проката. Зотов В. Ф. 2000.

Готовятся к изданию

1. Водород в конструкционных сталях. КАСАТКИН Г. Н. Произв.-практ. изд. II – III кв. 2002.
2. Производство профильных труб. ДАНЧЕНКО В. Н. и др. Науч. изд. II – III кв. 2002.
3. Технология трубного производства. ДАНЧЕНКО В. Н., КОЛИКОВ А. П., РОМАНЦЕВ В. А. и др. IV кв. 2002.

Справки по телефонам: (095) 299-97-85, 755-90-91. Факс: (095) 755-90-40

E-mail: internet@aha.ru

Адрес: 127006, Москва, Старопименовский пер., дом 8, подъезд 2. "Интермет Инжиниринг"

Аннотации на выпускаемые книги публикуются в журналах "Сталь" и "Новые огнеупоры"