



*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:  $\Theta, \xi, \lambda$  — 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;  $T_\phi$  — 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;  $\gamma$  — плотность;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $c$  — удельная теплоемкость;  $q_\phi$  — 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 алюминийского 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  $\tau^*$  – время затвердевания слитка по решению Лейбензона;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – поправочные функции, учитывающие теплосодержание твердой и жидкой фаз (перегрев).

Поправочные функции  $\beta_1$  и  $\beta_2$  и величина  $\tau^*$  определяются по графикам, приведенным на рис. 1,

где  $Po = \frac{q}{c_2(T_0 - T_{лик})}$  – критерий Постольника.

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

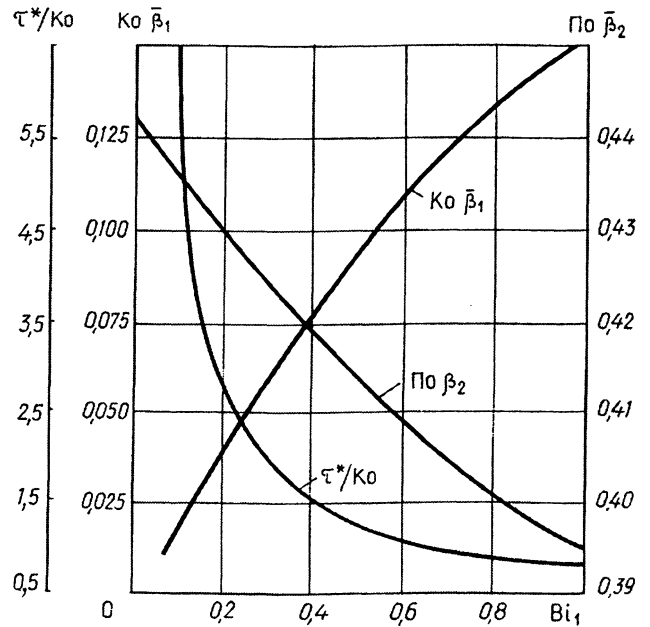


Рис. 1. Изменения  $\tau^*/Ko$ ,  $Ko \beta_1$ ,  $Po \beta_2$  в зависимости от величины критерия  $Bi_1$

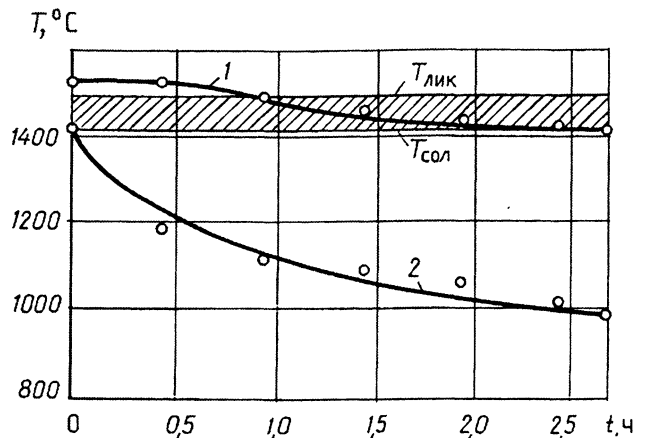


Рис. 2. Динамика затвердевания слитка: (1 – температура центра; 2 – температура поверхности); — — — результаты численного моделирования; ооо – промышленный эксперимент

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](mailto: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"