

УДК 669 – 154:66.065.5:086.5

**Б. А. Кириевский, Л. Г. Омелько, В. В. Христенко \***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев

\*Национальный технический университет Украины “КПИ им. Игоря Сикорского”, г. Киев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ

Разработана методика расчета температурного поля системы кристаллизатор – замороженный слой – расплав, а также зависимости толщины замороженного слоя от времени. В соответствии с ней система кристаллизатор – замороженный слой – расплав разбивается на элементарные объемы (слои) одинаковой толщины  $\delta$  и рассчитывается средняя температура каждого из элементарных объемов для каждого  $i$ -го промежутка времени  $\Delta\tau_i$ :

$$t_n^{(i)} = t_n^{(i-1)} + \Delta t_n^{(i)} \quad (1)$$

Изменение температуры  $\Delta t_n^{(i)}$  элементарного объема в течении каждого из промежутков времени  $\Delta\tau_i$  определяется по формуле:

$$\Delta t_n^{(i)} = \frac{Q_{1_n}^{(i)} - Q_{2_n}^{(i)}}{c_{\text{эф}}^{(i)} \cdot m_n}, \quad (2)$$

где  $Q_{1_n}^{(i)}$  ( $Q_{2_n}^{(i)}$ ) - количество тепла подведенного (отведенного) к  $n$ -му элементарному объему в течении  $i$ -го промежутка времени;  $c_{\text{эф}}^{(i)}$  - удельная эффективная теплоемкость вещества  $n$ -го слоя в интервале времени  $\Delta\tau_i$ ;  $m_n$  - масса  $n$ -го элементарного объема.

Количество тепла, подведенного к  $n$ -му элементарному объему ( $Q_{1_n}^{(i)}$ ) и отведенного от него за  $i$ -й промежуток времени ( $Q_{2_n}^{(i)}$ ), определяется из уравнения теплопроводности [1, 2]:

$$Q_{1_n}^{(i)} = \lambda_n^{(i)} \frac{\Theta_n^{(i-1)}}{\delta} S_n \Delta\tau^{(i)}, \quad Q_{2_n}^{(i)} = \lambda_{n-1}^{(i)} \frac{\Theta_{n-1}^{(i-1)}}{\delta} S_{n-1} \Delta\tau^{(i)} \quad (3)$$

где  $\lambda_n^{(i)}$  - коэффициент теплопроводности вещества  $n$ -го слоя;  $\Theta_n^{(i-1)}$ ,  $\Theta_{n-1}^{(i-1)}$  - разности температур между рассматриваемым ( $n$ -ным) и внешним по отношению к нему ( $(n + 1)$ -м) слоями, рассчитанные для  $(i - 1)$ -го промежутка времени ( $\Delta\tau_{i-1}$ );  $S_n, S_{n-1}$  - площади внешней и внутренней поверхности слоя.

Если вещество в слое пребывает в гомогенном состоянии, то  $c_{эф}$  представляет собой удельную теплоемкость вещества при данной температуре. Для случая намораживания однокомпонентных сплавов, на период кристаллизации металла,  $c_{эф}$  представляет собой скрытую теплоту кристаллизации. При намораживании многокомпонентных сплавов (кристаллизация происходит в интервале температур, а в кристаллизующемся слое вещество пребывает в двухфазном состоянии) величина  $c_{эф}$  определяется количеством теплоты, выделившейся как в результате охлаждения фаз, так и в результате кристаллизации.

В качестве примера рассматривалось намораживание расплава цинка на алюминиевый кристаллизатор (рис. 1).

Для расчетов диаметр ванны расплава принимали равным 140 мм, диаметр кристаллизатора – 40 мм; начальная температура кристаллизатора и расплава – соответственно 20 и 440 °С. Толщина элементарного объема ( $\delta$ ) принималась равной  $5 \cdot 10^{-4}$  м, а элементарный промежуток времени ( $\Delta\tau_i$ ) -  $10^{-3}$  с.

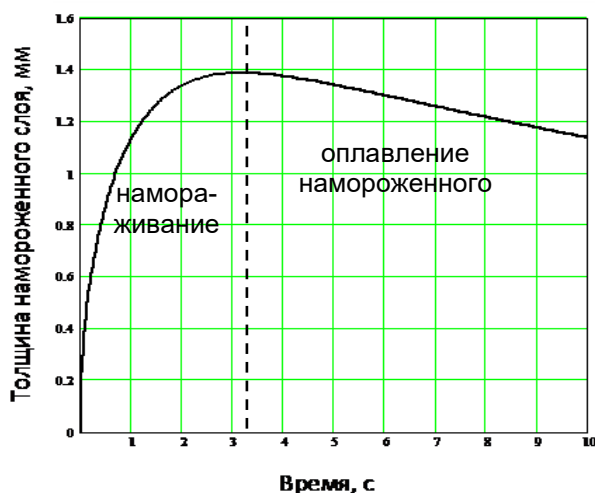


Рис. 1. Изменение толщины замороженного металла в зависимости от времени

Для расчета процесса намораживания многокомпонентных расплавов необходимо знать температурные зависимости тепловых эффектов при охлаждении (определение температурных зависимостей эффективной теплоемкости).

### Список литературы

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – с. 600.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.