
ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 669-154:66.065.5:086.5

Б. А. Кириевский, Л. Г. Омелько

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАМОРАЖИВАНИЯ РАСПЛАВА НА ВНЕШНЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА

Разработана методика расчета температурного поля системы кристаллизатор-намороженный слой-расплав при намораживании расплава на внешнюю поверхность цилиндрического кристаллизатора. Методика также позволяет определить толщину намороженного слоя с учетом значений теплофизических характеристик.

Ключевые слова: намораживание, кристаллизатор, математическая модель, температурное поле, намороженный слой.

Розроблена методика розрахунку температурного поля системи кристалізатор-наморожений шар-розплав для процесу наморожування розплаву на зовнішню поверхню циліндричного кристалізатора. Методика також дозволяє визначити товщину намороженого шару, враховуючи значення теплофізичних характеристик.

Ключові слова: наморожування, кристалізатор, математична модель, температурне поле, наморожений шар.

A calculating method of freezing melt on crystallizer outside surface temperature field by system crystallizer-freezing layer-melt has been developed. The method allows to calculate both the system temperature field and the freezing layer thickness, considering value of thermal properties.

Keywords: freezing, crystallizer, mathematical model, temperature field, freezing layer.

К числу наиболее прогрессивных методов получения отливок относится литье намораживанием. Особенностью метода является формирование отливки под действием направленного теплоотвода в условиях свободного питания фронта кристаллизации жидким металлом, что обеспечивает получение качественных плотных отливок без большинства литейных дефектов. Отпадает необходимость в применении формовочных и стержневых смесей, что существенно упрощает технологический процесс.

При намораживании кристаллизация начинается с поверхности, контактирующей с кристаллизатором, в то время как прочие слои расплава имеют более высокую

Затвердевание сплавов

температуру. С течением времени в зависимости от величины перегрева жидкого металла, размеров кристаллизатора и ванны расплава, появившаяся твердая корка может либо охлаждаться и затвердевание будет продолжаться, либо наоборот, прогреваться со стороны расплава и, следовательно, может частично, а в некоторых случаях полностью расплавиться.

Однако широкое использование данного способа сдерживается отсутствием надежных методов определения технологических параметров процесса, главным образом, – температурных и временных [1-3]. Поэтому целью данной работы была разработка модели процесса намораживания, которая бы позволила определять толщину намороженного слоя в зависимости от начальных параметров процесса и теплофизических величин.

Рассматривался процесс намораживания на внешнюю поверхность цилиндрического кристаллизатора при погружении в расплав. Теплопередача вдоль оси кристаллизатора не учитывалась. В первоначальном виде модель разработана для процесса намораживания чистых металлов или эвтектик, которые кристаллизуются при постоянной температуре.

В принятой модели система кристаллизатор-намороженный слой-расплав разбивается на концентрические элементарные объемы (слои) одинаковой толщины δ (рис. 1), в которых температура в любой из точек считалась равной средней температуре слоя. Средняя температура каждого элементарного объема рассчитывалась для каждого промежутка времени Δt . Для обеспечения устойчивого решения задачи элементарный промежуток времени Δt и элементарную толщину слоя δ следует выбирать из условия [5]

$$\frac{\Delta t \cdot a}{\delta^2} \leq \frac{1}{2}, \quad (1)$$

где a – температуропроводность вещества, $\text{м}^2/\text{с}$.

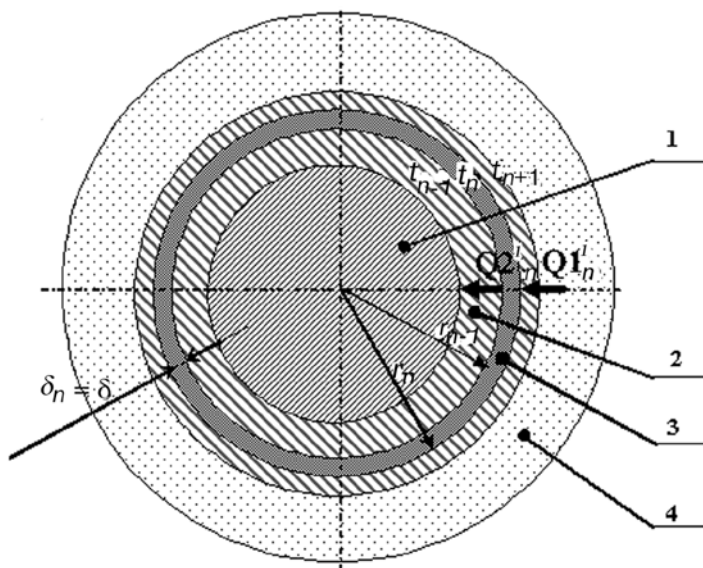


Рис. 1. Схема расчета средней температуры элементарного объема в системе кристаллизатор-намороженный слой-расплав: 1 – кристаллизатор; 2 – намороженный слой металла; 3 – рассматриваемый элементарный объем толщиной δ ; 4 – расплав

Затвердевание сплавов

Предполагалось, что средняя температура элементарного объема в течение промежутка времени Δt остается постоянной и мгновенно изменяется лишь по завершении данного промежутка времени [4, 5].

На момент полного погружения кристаллизатора температура в любой точке расплава принималась равной начальной температуре расплава ($t_{\text{рас}}$), а температура в любой точке кристаллизатора – его начальной температуре ($t_{\text{к-ра}}$). Непосредственно после погружения (в начальный промежуток времени Δt_1) нагревается наружный элементарный объем кристаллизатора и охлаждается элементарный объем расплава, непосредственно контактирующий с кристаллизатором. В дальнейшем происходит теплопередача от более нагретых элементарных объемов к менее нагретым [4, 5]. Изменение температуры элементарного объема в течение каждого из промежутков времени Δt_i определяется разностью количеств подведенного и отведенного от него тепла [6]

$$\Delta t_n^{(i)} = \frac{Q_{1n}^{(i)} - Q_{2n}^{(i)}}{c_n^{(i)} \cdot m_n^{(i)}}, \quad (2)$$

где $Q_{1n}^{(i)}$ – количество тепла, подведенного к n -му элементарному объему в течение i -го промежутка времени, Дж; $Q_{2n}^{(i)}$ – количество тепла, отведенного от n -го элементарного объема в течение i -го промежутка времени, Дж; $c_m^{(i)}$ – удельная теплоемкость вещества n -го элементарного объема в течение i -го промежутка времени, Дж/(кг · °С); $m_n^{(i)} = \gamma_n^{(i)} \cdot V_n$ – масса n -го элементарного объема в течение i -го промежутка времени, кг; $\gamma_n^{(i)}$ – удельная масса вещества n -го элементарного объема, кг/м³; V_n – величина n -го элементарного объема толщиной δ , м³.

Количество тепла, подведенное к внешней поверхности n -го элементарного объема за i -й промежуток времени, определяется из уравнения теплопроводности [6]

$$Q_{1n}^{(i)} = \lambda_n^{(i)} \frac{t_{n+1}^{(i-1)} - t_n^{(i-1)}}{\delta} S_n \Delta \tau^{(i)}, \quad (3)$$

где $\lambda_n^{(i)}$ – коэффициент теплопроводности вещества n -го объема в течение i -го промежутка времени $\Delta \tau^{(i)}$, Дж/(с · м); $\delta = \delta_n$ – толщина элементарного объема, на которые условно разбита система, м; S_n – площадь контакта между n -м и $(n+1)$ -м элементарными объемами, м²; $t_n^{(i-1)}$ – температура рассматриваемого элементарного объема в предыдущий момент времени ($\Delta \tau_{i-1}$), °С; $t_{n+1}^{(i-1)}$ – температура внешнего (по отношению к рассматриваемому) элементарного объема в предыдущий момент времени ($\Delta \tau_{i-1}$), °С;

Количество тепла $Q_{2n}^{(i)}$, отведенного за i -й промежуток времени, от n -го элементарного объема равно количеству тепла $Q_{1n-1}^{(i)}$, подведенного к внутреннему $(n-1)$ -му элементарному объему, и определяется выражением [6]

$$Q_{2n}^{(i)} = \lambda_{n-1}^{(i)} \frac{t_n^{(i-1)} - t_{n-1}^{(i-1)}}{\delta} S_{n-1} \Delta \tau^{(i)}, \quad (4)$$

где $\lambda_{n-1}^{(i)}$ – коэффициент теплопроводности вещества $(n-1)$ -го элементарного объема в течение i -го промежутка времени $\Delta \tau^{(i)}$, Дж/(с · м); $t_n^{(i-1)}$ – температура рассматриваемого элементарного объема в предыдущий промежуток времени ($\Delta \tau_{i-1}$), °С; $t_{n-1}^{(i-1)}$ – температура внутреннего (по отношению к рассматриваемому) элементарного объема в предыдущий промежуток времени ($\Delta \tau_{i-1}$), °С.

Затвердевание сплавов

Тогда среднюю температуру n -го элементарного объема в течение i -го промежутка времени можно определить по формуле

$$t_n^{(i)} = t_n^{(i-1)} + \Delta t_n^{(i)}. \quad (5)$$

Алгоритм расчета температурного поля системы кристаллизатор-намороженный слой-расплав составлен с учетом следующих особенностей:

– Если расчетное значение температуры n -го элементарного объема расплава в течение i -го промежутка времени $\Delta t^{(i)}$ оказывается меньше температуры кристаллизации, то промежуток времени $\Delta t^{(i)}$ программно уменьшается так, чтобы расчетная величина температуры рассматриваемого объема стала равной (с некоторой заранее заданной погрешностью) температуре кристаллизации. В этом случае значения температур каждого из элементарных объемов пересчитываются для новой длительности $\Delta t^{(i)}$. Для сокращения длительности вычислений при дальнейших расчетах программно устанавливается начальное значение элементарного промежутка времени Δt ;

– В течение кристаллизации (плавления) температура элементарного объема постоянная. Критерием окончания фазового превращения в элементарном объеме является равенство суммарного количества поглощенной (в случае кристаллизации расплава) или отданной (в случае оплавления уже намороженного металла) теплоты теплоте фазового превращения этого элементарного объема

$$\sum (Q_{1n}^{(i)} - Q_{2n}^{(i)}) = \rho_n m_n, \quad (6)$$

где ρ_n – удельная скрытая теплота кристаллизации (плавления) вещества n -го объема, Дж/кг;

– Процесс намораживания продолжается до тех пор, пока количество тепла, отводимого от кристаллизующегося элементарного объема, превышает количество тепла, подводимого к нему из расплава.

Алгоритм позволяет учитывать изменения теплоемкости, теплопроводности и удельной массы вещества в зависимости от температуры.

В качестве примера рассматривалось намораживание расплава цинка на алюминиевый кристаллизатор (значения теплофизических величин, приведенных в таблице [7]). Для расчетов диаметр ванны расплава принимался равным 140 мм, диаметр кристаллизатора – 40 мм, начальная температура кристаллизатора и расплава – соответственно 20 и 440 °С. Толщина элементарного объема принималась равной 5×10^{-4} м, а промежуток времени – 10^{-3} с.

Теплофизические характеристики материалов кристаллизатора и расплава

Материал кристаллизатора и расплава	Удельная скрытая теплота кристаллизации (плавления), Дж/кг	Удельная масса, кг/м ³	Температурная зависимость теплоемкости, Дж/(кг · °С)	Теплопроводность, Дж/(с · м)	Температура плавления, °С
Расплав ($Zn_{жид}$)	389670	6700	480	95	420
Намороженный слой ($Zn_{тв}$)		7140	$342 + 0,154(273 + t_n^{(i)})$	110	
Кристаллизатор ($Al_{тв}$)	111330	2700	$760 + 0,459(273 + t_n^{(i)})$	213	660
$Al_{жид}$		2380	1085	184	

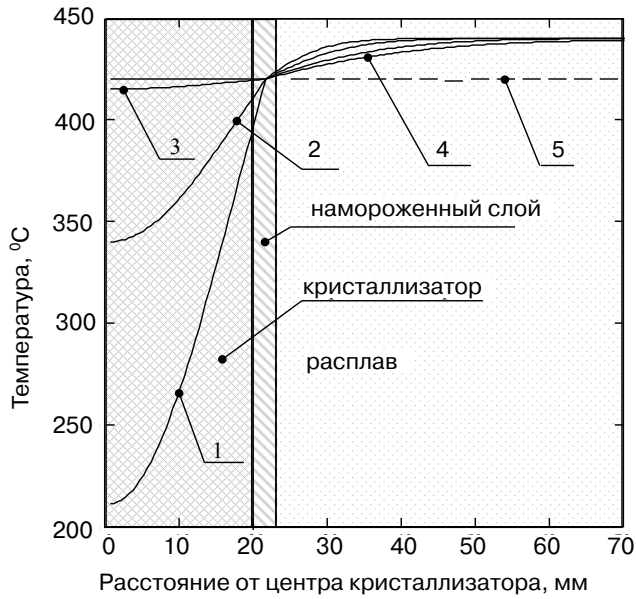


Рис. 2. Температурные поля системы кристаллизатор-намороженный слой-расплав для различных моментов времени: 1 – на 1-й секунде; 2 – на 2-й; 3 – на 5-й; 4 – на 10-й; 5 – температура плавления цинка

Моделирование процесса намораживания с помощью данного алгоритма позволяет рассчитать температурное поле системы кристаллизатор-намороженный слой-расплав в любой момент времени (рис. 2), временные зависимости температуры в различных точках системы (рис. 3), а также зависимость толщины намороженного слоя от времени (рис. 4) и изменения скорости намораживания от времени (рис. 5)

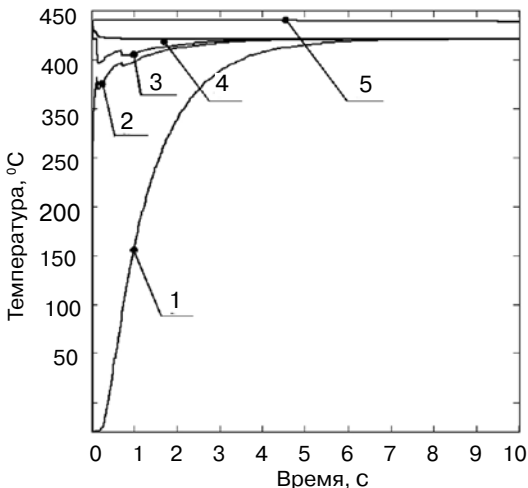


Рис. 3. Изменения температуры в различных точках системы: 1 – центр кристаллизатора; 2 – наружная поверхность кристаллизатора; 3 – 21 мм от центра кристаллизатора (намороженный слой); 4 – 22 мм от центра кристаллизатора (намороженный слой); 5 – 70 мм от центра кристаллизатора (расплав)

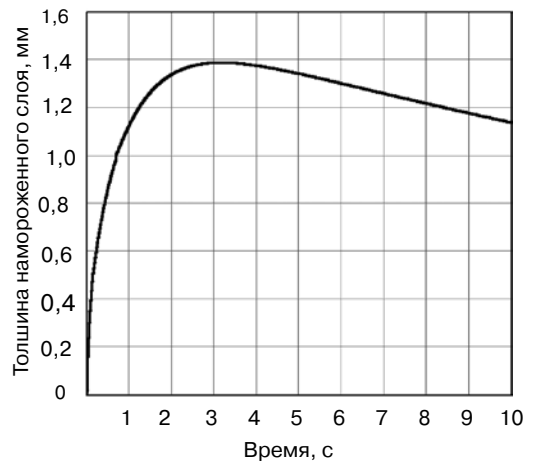


Рис. 4. Изменение толщины намороженного металла в зависимости от времени

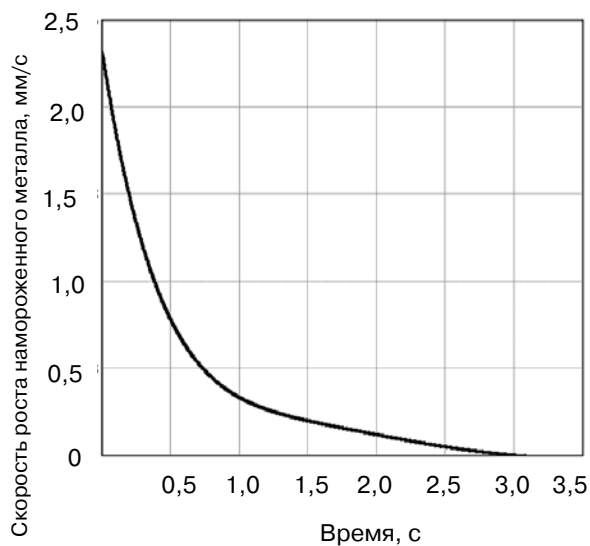


Рис. 5. Изменение скорости роста замороженного слоя в зависимости от времени



Список литературы

1. Вейник А. И. Теория особых видов литья. – М.: Машингиз, 1958. – 300 с.
2. Баландин. Г. Ф. Литье намораживанием. – М.: Машинзиг, 1962. – 261 с.
3. Ксенофонов Б. М. Получение деталей методами намораживания. – М.: Машингиз, 1947. – 56 с.
4. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. – М: Высш. шк., 1990. – 207 с.
5. Затвердевание металлов и металлических композиций / В. А. Лейбензон, В. Л. Пилюшенко, В. М. Кондратенко и др. – Киев: Наук. думка, 2009. – 410 с.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности (Учебное пособие для вузов). – М.: ГИТТЛ, 1952. – 392 с.
6. Самсонов Г. В. Свойства элементов. – М.: Metallургия, 1976. – Ч. 1. – 600 с.

Поступила 05.06.2014