



*The mathematical model of casting process and numerical investigations on determination of the continuous casting fitting parameters for production of slugs of zinc anodes are described.*

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. А. ПУМПУР, В. М. ИЛЬЮШЕНКО, Ю. В. ПЕТРУНЯ,  
Институт технологии металлов НАН Беларуси

УДК 621.74:517.977

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ В ЛЕНТОЧНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР

Существующие технологии изготовления цинковых анодов являются либо сложными и высокозатратными, требующими вложения больших капитальных затрат на создание производства и оборудования, либо низкопроизводительными, требующими больших трудовых затрат на изготовление продукции. Решением данной проблемы может быть создание нового простого и дешевого технологического процесса и оборудования, способного удовлетворить потребности предприятий Республики Беларусь в цинковых анодах.

Одним из наиболее высокопроизводительных способов получения плоской отливки является литье полосы между бесконечными лентами [1]. Метод реализован в 50-х годах в США К.В. Хазелеттом. Установки "Hazelett" нашли промышленное применение для непрерывного литья листовых заготовок из цветных металлов в ленточных кристаллизаторах.

На установках с двумя бесконечными лентами получают полосу толщиной 12,7–25,4 мм, шириной до 1000 мм. Но при этом для устранения дефектов, которые возникают в процессе литья, необходима горячая прокатка. К таким дефектам относятся неодинаковая толщина отливки, неоднородная структура и пористость. Основной причиной возникновения этих дефектов является коробление рабочих лент в процессе литья. Способ нашел применение на заводах с большим объемом выпуска проката из-за громоздкости плавильных печей, литейного агрегата и расположенных за ним станов горячей прокатки.

В ИТМ НАН Беларуси проводятся исследования возможности использования усовершенствованного способа литья между двумя металлическими лентами для получения заготовок цинковых анодов (рис. 1). Сущность способа состоит в том, что жидкий металл 7 подается в полость между двумя водоохлаждаемыми рабочими металлическими лентами 1 и 2 толщиной 1,5 мм, натянутыми на двух приводных 5, опорном 6 и натяжном 11 роликах. Толщину получаемой заготовки 9 определяет глубина специально проточенной в барабане 1 полости 4, ширина которой определяет ширину заготовки. Для отвода тепла предусматривается мощное водяное охлаждение 6. В результате формирования отливки происходит в основном на участке от точки заливки расплава до той точки, где отливка выходит за пределы полости. Очевидно, что нижняя часть отливки будет выходить за пределы полости раньше, чем верхняя.

Данный способ литья является наиболее простым и дешевым, т.е. ресурсосберегающим способом получения заготовок цинковых анодов, в то же время – высокопроизводительным.

С целью создания технологического процесса непрерывного литья в ленточный кристаллизатор отливок из цветных металлов необходимо решить следующие основные задачи:

- разработать математическую модель формирования отливки в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения и выполнить экспериментально-теоретические исследования по определению значений параметров теплообмена;
- исследовать основные особенности и закономерности затвердевания заготовок из цинка;
- разработать схему технологического процесса литья полосы из цинка в кристаллизатор, состоящий из барабана и двух бесконечных лент;
- изучить температурный режим кристаллизатора и разработать методику определения параметров его охлаждения;

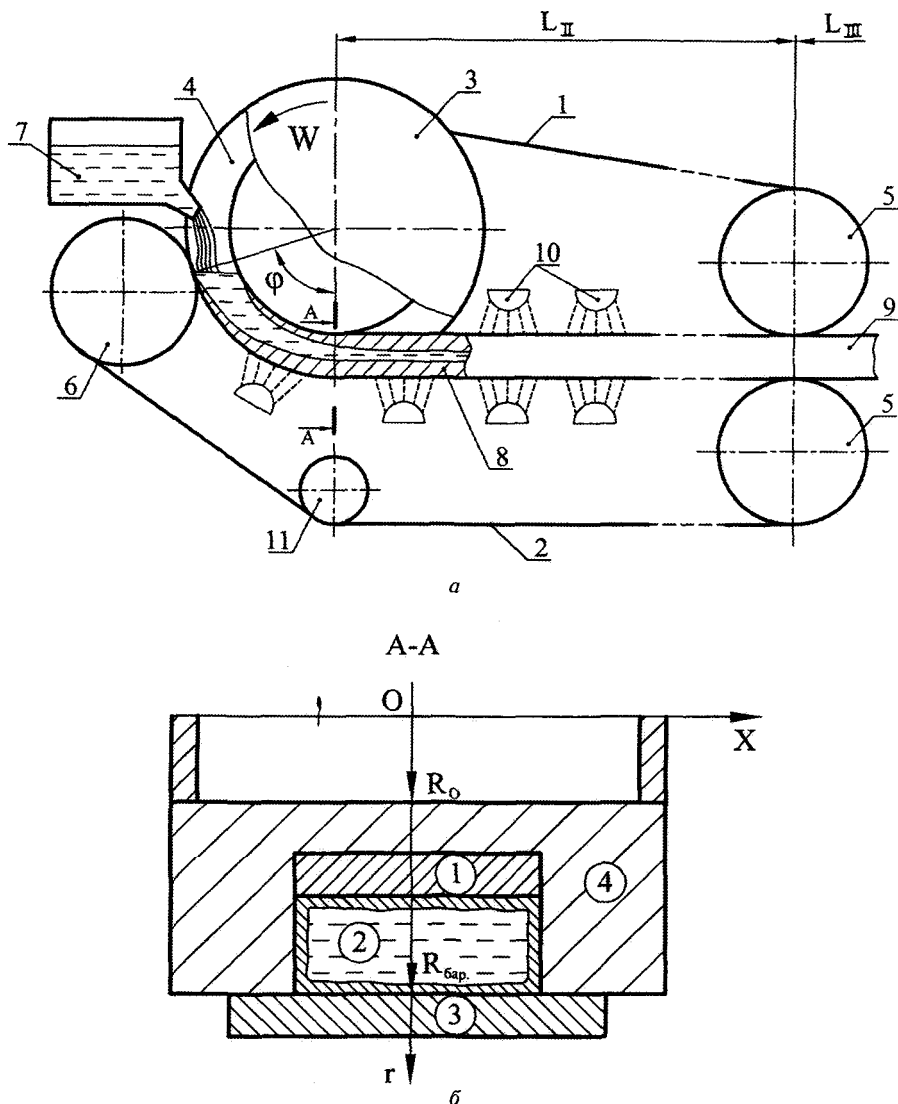


Рис. 1. Схема к расчету теплообмена при непрерывном литье в ленточный кристаллизатор: *a* – схема установки непрерывного литья (1 – узкая лента; 2 – широкая лента; 3 – барабан; 4 – полость проточки; 5 – приводной ролик; 6 – прижимной ролик; 7 – расплав; 8 – затвердевшая корка; 9 – цинковая полоса; 10 – водяное охлаждение; 11 – натяжной ролик); *б* – схема расчетных областей (в кружках – номера расчетных областей)

- изучить температурный режим извлеченной из кристаллизатора полосы и определить режим ее охлаждения;
- установить технологические параметры режимов литья и определить основные параметры оборудования для литья цинковой полосы;
- апробировать технологический процесс и оборудование в условиях опытно-промышленного производства.

Процесс непрерывного литья в ленточный кристаллизатор характеризуется наличием трех зон формирования цинковой полосы:

I – зона затвердевания отливки в канале проточки барабана протяженностью  $\varphi$ , град (рис. 1, *a*);  
 II – зона интенсивного водяного охлаждения отливки между лентами до полного ее затвердевания протяженностью  $L_{II}$ , мм;

III – зона охлаждения полосы на воздухе до необходимой температуры протяженностью  $L_{III}$ , мм.

Протяженность зоны I (величина угла  $\varphi$ ) зависит от места установки прижимного ролика. Месторасположение прижимного ролика необходимо определять исходя из следующих соображений.

Во избежание значительного изгиба формируемой полосы целесообразно, чтобы величина угла  $\varphi$  была наименьшей, а диаметр колеса наибольший. С другой стороны, необходимо, чтобы толщина корки, затвердевшей к моменту снятия полосы с барабана на лентах 1 и 2 и вертикальной стенке проточки барабана 4, была достаточной для обеспечения стабильности процесса в дальнейшем. Из проведенных ранее экспериментальных исследований известно, что при намораживании цинковой корки толщиной 1,5–2,0 мм не происходит ее расплавления при условии обеспечения интенсивного теплоотвода. При

этом в первую очередь корка такой толщины должна намораживаться со стороны боковой поверхности отливки, в дальнейшем открытой, а значит, наиболее подверженной расплавлению.

Толщина корки, сформированной за время затвердевания в проточке, т.е. до момента выхода полосы в зону II  $\tau_{\text{вых}}$ , прямо пропорциональна времени  $\tau_{\text{вых}}$  и обратно пропорциональна скорости литья  $V$ .

Таким образом, необходимо, в первую очередь, найти скорость литья  $V$  и месторасположение опорного ролика, т.е. протяженность зоны I  $\phi$ , которые обеспечат стабильность процесса формирования цинковой отливки при прочих заданных условиях и параметрах литья.

Протяженность зоны II интенсивного водяного охлаждения отливки  $L_{II}$  зависит от скорости литья  $V$ , структуры отливки после выхода из зоны I, интенсивности водяного охлаждения лент и боковых поверхностей отливки, а также от условий контактного теплообмена между поверхностями отливки и рабочими поверхностями лент кристаллизатора. Скорость литья и структура отливки – это уже известные параметры для определения величины  $L_{II}$ .

Определение протяженности зоны III является в дальнейшем тривиальной задачей.

Для достижения поставленных целей и решения указанных задач разработан комплекс двумерных математических моделей в квазистационарной постановке, описывающих процесс теплообмена формирующейся цинковой отливки при литье в кристаллизатор ленточного типа.

Рассмотрим математическую модель процесса затвердевания цинковой отливки в зоне I (рис. 1, б). Уравнение теплопроводности системы тел барабан 4 – узкая лента 1 – отливка 2 – широкая лента 3 имеет вид

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $i=1, 2, 3, 4$  – номера расчетных областей.

Начальные условия:

$$T_{1,3} \Big|_{\tau=0} = T_{\text{лент}}, \quad T_2 \Big|_{\tau=0} = T_{\text{зал}}, \quad T_4 \Big|_{\tau=0} = T_{\text{бар}}. \quad (2)$$

Граничные условия в зоне I формирования отливки (расчетные области 4, 1, 2 и 3):  
граничные условия вдоль оси  $Oz$ :

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \alpha_{4,в} (T_4 - T_{в4}) \Big|_{r=R_0}, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_0+\delta_{\text{бар}}} = \alpha_{1,4} (T_1 - T_4) \Big|_{r=R_0+\delta_{\text{бар}}} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big|_{r=R_0+\delta_{\text{бар}}}, \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_0+\delta_{\text{бар}}+\delta_{\text{лент}}} = \alpha_{1,2} (T_1 - T_2) \Big|_{r=R_0+\delta_{\text{бар}}+\delta_{\text{лент}}} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_0+\delta_{\text{бар}}+\delta_{\text{лент}}}, \quad (5)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{бар}}} = \alpha_{2,3} (T_2 - T_3) \Big|_{r=R_{\text{бар}}} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{бар}}}, \quad (6)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{бар}}+\delta_{\text{лент}}} = \alpha_{3,в} (T_3 - T_{в3}) \Big|_{r=R_{\text{бар}}+\delta_{\text{лент}}}; \quad (7)$$

граничные условия вдоль оси  $Ox$ :

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (8)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0,5l_{\text{лент}}} = \alpha_{в} (T_1 - T_{в}) \Big|_{x=0,5l_{\text{лент}}}, \quad (9)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=0,5l_{\text{отл}}} = \alpha_{2,4} (T_2 - T_4) \Big|_{x=0,5l_{\text{отл}}} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0,5l_{\text{отл}}}, \quad (10)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=0,5l_{\text{бар}}} = \alpha_{в} (T_4 - T_{в}) \Big|_{x=0,5l_{\text{бар}}}, \quad (11)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=0,5l_{\text{отл}}} = \alpha_{1,4} (T_1 - T_4) \Big|_{x=0,5l_{\text{отл}}} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0,5l_{\text{отл}}}, \quad (12)$$

где  $T_{бар}$ ,  $T_{зал}$ ,  $T_{лент}$  – начальные температуры барабана, расплава и лент;  $T_{в3}$ ,  $T_{в4}$  – температура охлаждающей воды на поверхности широкой ленты и внутренней поверхности барабана;  $\alpha_{4,в}$ ,  $\alpha_{3,в}$  – коэффициенты конвективного теплообмена на внутренней водоохлаждаемой поверхности барабана и внешней водоохлаждаемой поверхности широкой ленты;  $\alpha_{1,2}$ ,  $\alpha_{2,3}$  – коэффициенты контактного теплообмена между отливкой и узкой и широкой лентами;  $\alpha_{1,4}$ ,  $\alpha_{3,4}$ ,  $\alpha_{2,4}$  – соответственно коэффициенты контактного теплообмена между узкой и широкой лентами, отливкой и поверхностью проточки барабана;  $\alpha_в$  – коэффициент конвективного теплообмена поверхностью ленты и барабана с воздухом;  $R_0$ ,  $R_{бар}$  – внутренний и внешний радиусы барабана;  $\delta_{бар}$ ,  $\delta_{лент}$  – толщина стенки барабана и ленты;  $l_{отл}$ ,  $l_{лент}$ ,  $l_{бар}$  – ширина отливки (полосы), широкой ленты, барабана.

Предполагается, что ленты и барабан успевают охладиться на воздухе к моменту входа в контакт с расплавом до температур, равным их начальным температурам.

Для описания процесса затвердевания использовали метод “размазывания” фронта фазового перехода, основанный на введении фиктивного интервала затвердевания в окрестности температуры кристаллизации. Этот метод позволяет уйти от прямого решения задачи Стефана для чистых металлов и узкоинтервальных сплавов [2]. При этом вместо  $c_2$  вводили эффективную теплоемкость:

$$c_2(T_2) = \begin{cases} c_T(T_2), & T_2 < T_c, \\ c_T(T_2) - L \frac{\partial \psi}{\partial T_2}, & T_c \leq T_2 \leq T_D, \\ c_J(T_2), & T_2 > T_D, \end{cases} \quad (13)$$

где  $c_T(T_2)$ ,  $c_J(T_2)$  – теплоемкость твердой и жидкой фаз отливки;  $\partial \psi / \partial T_2$  – темп кристаллизации;  $\psi$  – доля твердой фазы в двухфазной зоне (по квазиравновесной модели);  $L$  – удельная скрытая теплота кристаллизации.

Уравнение теплопроводности (1) решали методом конечных разностей с использованием неявной схемы. Температурные поля определяли на основе метода прогонки [3]. Толщина затвердевшей отливки в каждый момент времени определялась путем отслеживания положения линии солидуса по каждому из расчетных направлений ( $Ox$  и  $Oz$ ).

Математическая модель адаптирована к реальным условиям теплообмена на основе результатов ранее проведенных исследований по намораживанию цинка на подвижный металлический кристаллизатор [4, 5], согласно которым коэффициенты теплообмена расплавленного металла, начальной корки, отливки с поверхностью стальной ленты принимали равными соответственно 8000, 3000 и 5000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Были проведены расчеты по определению скорости литья  $V$  и месторасположения прижимного вала относительно вертикальной оси барабана – величины угла  $\varphi$ . Результаты расчетов приведены в таблице и на рис. 2, 3.

**Толщина корки, затвердевшей на вертикальной стенке проточки к моменту снятия с барабана**

Протяженность зоны I $\varphi$ , град	45	45	90	45	60	90
Скорость литья $V$ , м/мин	6	3	6	9	9	9
Координата по радиусу, $r$ , мм	Толщина корки на ребре барабана $\xi$ , мм					
	0	17,65	19	19	16,6	17,53
1	3,85	8,1	8,1	2,46	3,38	5,17
2	2,98	6,63	6,63	1,67	2,55	4,18
3	2,35	5,84	5,84	1,1	1,94	3,5
4	1,86	5,26	5,26	0,68	1,46	2,99
5	1,48	4,84	4,84	0,43	1,1	2,58
6	1,24	4,55	4,55	0,34	0,88	2,28
7	1,08	4,38	4,38	0,29	0,76	2,1
8	1	4,39	4,39	0,28	0,68	2,0
9	1	4,59	4,59	0,28	0,7	2,1
10	1,15	5	5	0,3	0,79	2,28
11	1,38	5,7	5,7	0,37	0,99	2,66
12	1,78	6,77	6,77	0,5	1,34	3,21
13	2,38	8,55	8,55	0,89	1,86	4,05
14	3,27	14,58	14,58	1,5	2,65	5,27
15	4,59	19	19	2,4	3,8	7,68
16	7,98	19	19	3,97	6,21	19

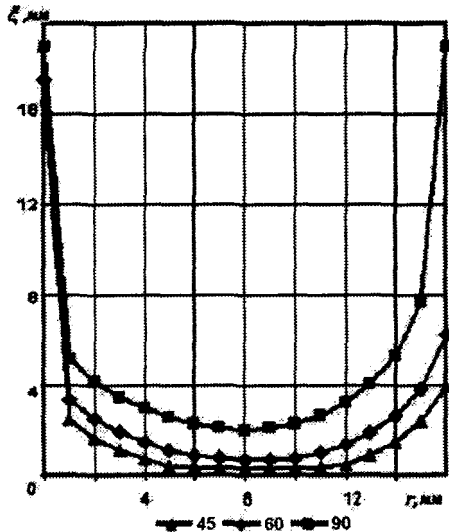


Рис. 2. Толщина корки, сформированной на боковой поверхности канала проточки при разном месторасположении прижимного ролика

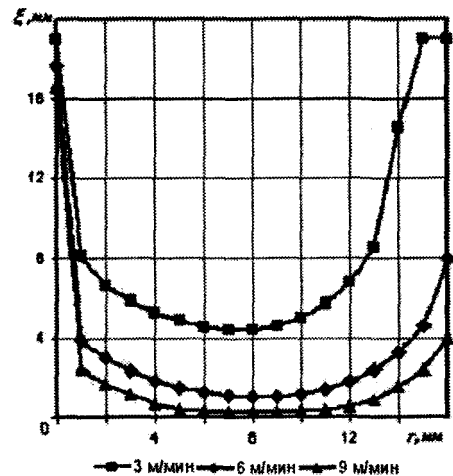


Рис. 3. Толщина корки, сформированной на боковой поверхности канала проточки при разных скоростях литья

На рис. 2 показаны графики, отражающие величину толщины корки, сформированной к моменту выхода из зоны I на вертикальной поверхности проточки, при различном месторасположении прижимного ролика к вертикальной оси барабана и наиболее производительной скорости литья  $V=9$  м/мин.

Анализ результатов расчетов показал, что при данной скорости литья наиболее предпочтительным является расположение ролика под углом  $\varphi_1=90^\circ$ , при котором минимальная толщина корки, сформированной на вертикальной поверхности проточки, превышает в основном 2 мм. Но, как указывалось ранее, такое месторасположение прижимного ролика нежелательно вследствие значительного изгиба формирующейся ленты.

На рис. 3 представлены графики, отражающие величину толщины корки, сформированной к моменту выхода из зоны I на вертикальной поверхности проточки, при различных скоростях литья при условии месторасположения прижимного ролика под углом  $45^\circ$  к вертикальной оси барабана.

Как видно из рисунка, при данном расположении прижимного ролика наиболее предпочтительной является скорость литья  $V=3$  м/мин. Однако такая скорость литья может не удовлетворить критерию производительности литейной установки. При скорости литья  $V=6$  м/мин минимальная толщина затвердевшей к моменту выхода из зоны I корки равна 1 мм, а участок, где толщина корки меньше 1,5 мм, не превышает 6 мм при толщине всей отливки 16,5 мм. Очевидно, что при  $\varphi_1=50-55^\circ$  при скорости литья  $V=6$  м/мин получаем удовлетворительные результаты, так же как при  $\varphi_1=45^\circ$  и скорости литья  $V=5$  м/мин.

Таким образом, можно сделать вывод о существовании вполне приемлемого режима литья со скоростью 5–6 м/мин при расположении прижимного ролика под углом  $45-50^\circ$  к вертикальной оси барабана. Как показали результаты расчетов, доля затвердевшего металла в сечении отливки к моменту выхода из зоны I для указанных параметров литья превышает 25%. Причем уменьшение скорости литья на 1 м/мин до 5 м/мин в большей степени влияет на величину корки, чем увеличение угла расположения ролика на  $5^\circ$  до  $50^\circ$ .

Результаты исследований на основе математического моделирования теплообмена при литье цинковой полосы были использованы при проектировании экспериментальной установки. В частности, были определены основные параметры установки, такие, как скорость литья, угол  $\varphi_1$ , определяющий величину зоны затвердевания отливки в канале проточки барабана, и протяженность зоны вторичного водяного охлаждения.

### Литература

1. Герман Э. Непрерывное литье. М.: Металлургиздат, 1961.
2. Кац А.М., Шадек Е.Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.
3. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Высш. шк., 1987.
4. Барановский Э.Ф., Севастьянов П.В. Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1989.
5. Барановский Э.Ф., Пумпур В.А. Параметрическая идентификация теплообмена непрерывного литья полос в кристаллизаторы роторного типа // Литье и металлургия. 2000. № 4. С. 21–22.