

*In the article there is described the mathematical model of horizontal continuous casting of zinc stripe. There are presented the results of numerical investigations.*

Э. Ф. БАРАНОВСКИЙ, В. М. ИЛЮШЕНКО, В. А. ПУМПУР, Ю. В. ПЕТРУНЯ,  
ИТМ НАН Беларуси

УДК 669.18.046

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИНКОВОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНО-ШАГОВОМ ЛИТЬЕ

В связи с увеличивающимся спросом РУП «БМЗ» на цинковые аноды назрела необходимость в использовании для литья заготовок под прокатку более производительного технологического процесса, чем литье в кокиль. В частности, представляет интерес использование горизонтального непрерывного литья (ГНЛ) в металлический кристаллизатор с получением легко разделяемого на мерные куски слитка без его механической резки. Заготовка должна иметь гладкую поверхность, пригодную для непосредственного изготовления катаных цинковых анодов.

В ИТМ НАН Беларуси предложена схема ГНЛ в металлический кристаллизатор с извлечением отливки с шагом  $t$ , соответствующим длине заготовки, необходимой для последующей прокатки (рис. 1). Отличительной особенностью этого процесса является то, что время формирования отливки в неподвижном состоянии (стадия остановки)  $\tau_{\text{ост}}$  намного больше времени ее движения (стадия извлечения). В этих условиях на слитке будут образовываться отсечки значительной глубины, расстояние между которыми соответствует

необходимой длине заготовки. После охлаждения вне кристаллизатора такая отливка должна легко разделяться без механической обработки на заготовки требуемой длины. Такой технологический процесс литья мы предлагаем назвать горизонтальным непрерывно-шаговым литьем.

Применение водоохлаждаемого металлического кристаллизатора решает проблему получения достаточно длинных заготовок, так как традиционно используемый для ГНЛ графитовый кристаллизатор очень дорогой, а период его эксплуатации небольшой.

На стадии разработки технологической установки следует выбрать ее конструктивные элементы и их геометрические параметры. К примеру, важнейшей задачей является определение такой конструкции кристаллизатора, которая обеспечивала бы необходимые условия теплообмена и питания отливки и требуемую продолжительность стадии остановки для получения высококачественной заготовки.

Для решения этих задач нужно определить продолжительность остановки отливки  $\tau_{\text{ост}}$ , мо-

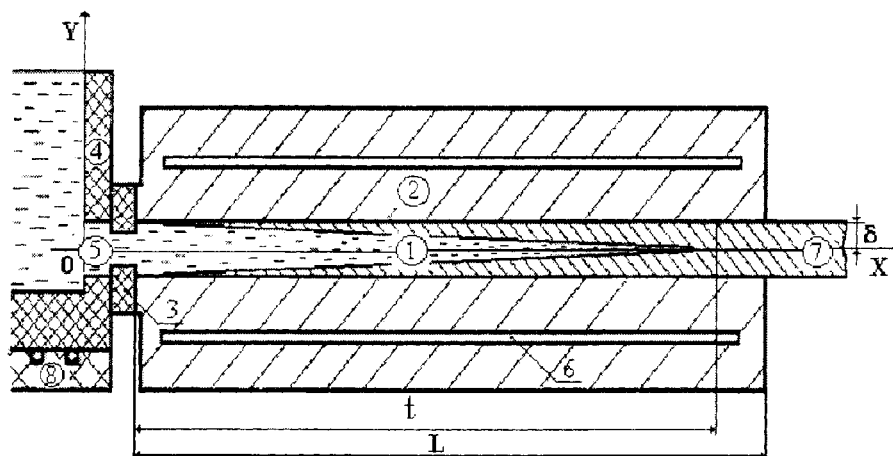


Рис. 1. Расчетные области задачи: 1 – отливка; 2 – кристаллизатор; 3 – соединительный стакан; 4 – стенка металлоприемника; 5 – отверстие питателя; 6 – канал водяного охлаждения; 7 – цинковая полоса; 8 – нагреватель;  $t$  – шаг вытяжки;  $L$  – длина кристаллизатора;  $\delta$  – половина толщины отливки

мент и продолжительность извлечения формирующейся отливки, оценить интенсивность теплообмена между отливкой и кристаллизатором, установить условия охлаждения кристаллизатора.

Кроме того, важно оценить влияние на процесс формирования отливки таких факторов, как величина перегрева расплава, начальная температура кристаллизатора, а также продолжительность выхода технологического процесса на квазистационарный режим работы.

С целью оценки влияния основных факторов на процесс формирования цинковой полосы при горизонтальном непрерывно-шаговом литье разработан пакет программ, позволяющий осуществить на ПЭВМ численное решение задачи затвердевания и охлаждения отливки на основе двумерной математической модели процесса теплообмена. На рис. 1 представлена схема расчетных областей задачи. В результате расчета определяли температурные поля в отливке (область 1), кристаллизаторе (область 2), соединительном стакане (область 3), питателе (область 4) и стенке металлоприемника (область 5).

При решении задачи были приняты следующие допущения. Температура расплава в металлоприемнике принималась постоянной и равной температуре заливки. Так как толщина полосы намного меньше ее ширины, то теплопередачей поперек отливки пренебрегали. Условия теплообмена принимались постоянными во времени на всех контактирующих поверхностях. Теплофизические свойства расплава, затвердевшего металла, кристаллизатора, соединительного стакана и металлоприемника принимались не зависящими от температуры.

Уравнение теплопроводности для рассматриваемой задачи имеет вид

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) \quad i=1,2,\dots,5,$$

где  $\rho_i$ ,  $c_i$ ,  $\lambda_i$  – соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала для  $i$ -й расчетной области;  $T_i$  – температурное поле для  $i$ -й расчетной области.

На границах расчетных областей принимали граничные условия третьего рода с постоянными коэффициентами теплообмена. В частности, на границе отливки с кристаллизатором принимали граничные условия третьего рода с коэффициентом контактного теплообмена  $\alpha_k$  (рис. 1):

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \alpha_k (T_1 - T_2), \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \alpha_k (T_1 - T_2),$$

где  $\delta$  – половина толщины отливки; индексы “1” и “2” относятся соответственно к отливке и кристаллизатору. Теплообмен кристаллизатора с водой учитывали посредством граничных условий третьего рода с постоянным коэффициентом  $\alpha_{\text{в}}$ .

Численное решение задачи осуществляли методом конечных разностей для каждой из расчетных областей [1]. Решение задачи формирования отливки при горизонтальном непрерывно-шаговом литье для каждого цикла вытяжки проводили в два этапа. На первом этапе решали задачу затвердевания отливки в кристаллизаторе, на втором этапе – задачу затвердевания в процессе извлечения отливки из кристаллизатора.

На основе разработанного пакета программ проведены численные исследования динамики затвердевания отливки. Оценивали влияние таких факторов, как интенсивность контактного теплообмена между отливкой и рабочей поверхностью кристаллизатора; интенсивность охлаждения кристаллизатора водой; продолжительность остановки отливки в кристаллизаторе  $\tau_{\text{ост}}$ ; начальная температура кристаллизатора  $T_0$ ; величина перегрева расплава  $\Delta T_{\text{пер}}$  на изменение объема жидкой фазы  $V$ , %, в объеме отливки, на глубину жидкой лунки в осевом сечении отливки  $H$ , мм (рис. 1), а также на температуру рабочей поверхности кристаллизатора.

В качестве базового был принят вариант расчета при следующих начальных значениях факторов: значение коэффициента контактного теплообмена между отливкой и рабочей поверхностью кристаллизатора  $\alpha_k$  принималось равным 2000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С) [2], значение коэффициента теплообмена кристаллизатора с водой  $\alpha_{\text{в}}$  – 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), величина перегрева принималась равной 30 °С, а начальная температура кристаллизатора – 100 °С. Расчеты проводили для кристаллизатора длиной 600 мм и шага вытягивания  $t = 500$  мм.

На основе анализа результатов численных экспериментов (см. таблицу) можно сделать следующие выводы. Процесс формирования отливки при постоянных условиях теплообмена на рабочей и водоохлаждаемой поверхностях кристаллизатора выходит на квазистационарный режим на седьмом – восьмом циклах вытягивания. Разница в объеме жидкой фазы между пятым и восьмым циклами вытягивания значительная и составляет почти 20 % (рис. 2); разница по глубине лунки перед извлечением отливки составляет лишь 10 мм (рис. 3). Причем к моменту извлечения отливки из кристаллизатора на восьмом цикле вытягивания глубина лунки превышает длину шага вытягивания, а это нежелательно, так как может привести к разрушению отливки при извлечении. К тому же объем жидкой фазы в отливке к этому моменту достигает 60 % от ее объема.

При увеличении интенсивности контактного теплообмена между отливкой и кристаллизатором в 2,5 раза ( $\alpha_k$  изменяется от 2000 до 5000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С)) наибольшая разница в объемах жидкой фазы в начале цикла вытягивания по сравнению с базовым вариантом составляет около 15 % (см. рис. 2), а к моменту извлечения отливки – около 9 %.

Результаты численных исследований по влиянию исходных факторов на объем жидкой фазы и глубину лунки

$\alpha_k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$\alpha_b$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$\Delta T_{пер}$ , °С	$\tau_{ост}$ , с	$T_0$ , °С	V, %		H, мм
					в начале цикла	в момент извлечения	
2000	1000	30	20	100	65,6	59,8	506
5000	1000	30	20	100	50,8	50,6	496
2000	2000	30	20	100	57,0	44,0	495
5000	2000	30	20	100	54,4	28,3	464
2000	1000	80	20	100	83,6	75,7	590
5000	2000	80	20	100	60,4	43,1	490
2000	1000	30	30	100	35,4	34,8	448
2000	1000	30	40	100	17,3	3,4	139
5000	2000	30	20	150	54,7	28,3	464

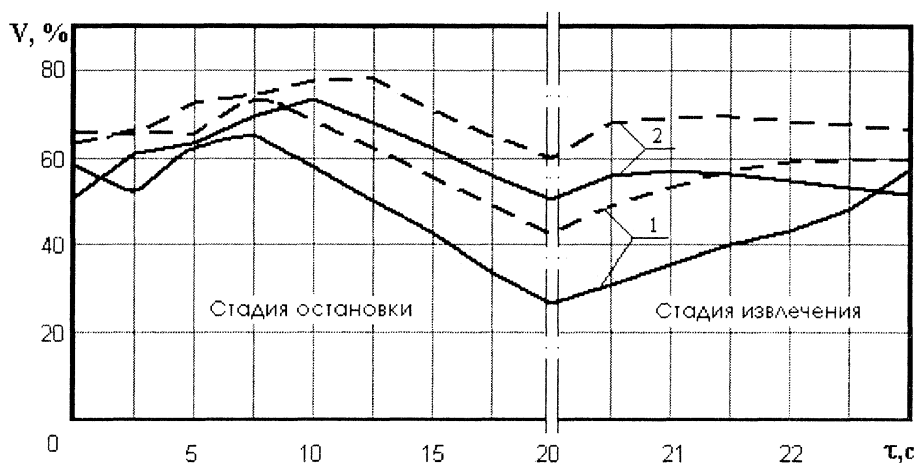


Рис. 2. Влияние интенсивности контактного теплообмена между отливкой и кристаллизатором на изменение объема жидкой фазы на различных циклах вытягивания: 1 — на пятом цикле; 2 — на восьмом цикле; — — — — —  $\alpha_k = 5000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С); — — — — —  $\alpha_k = 2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С)



Рис. 3. Изменение глубины лунки на различных циклах вытягивания: 1 — на втором цикле; 2 — на третьем цикле; 3 — на пятом цикле; 4 — на восьмом цикле (при базовом варианте расчета)

По глубине лунки отличия незначительны. Максимальная разница по температуре рабочей поверхности кристаллизатора достигает 50 °С.

При увеличении интенсивности охлаждения кристаллизатора в 2 раза ( $\alpha_v$  изменяется от 1000 до 2000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С)) разница в объемах жидкой фазы в начале цикла вытягивания достигает 9 %, а к моменту извлечения — 16 %. К этому времени объем жидкой фазы составляет около 30 %. Глубина лунки изменяется мало. Максимальная разница по температуре рабочей поверхности кристаллизатора составляет до 20 °С.

При увеличении перегрева расплава от 30 до 80 °С разница в объемах жидкой фазы в начале цикла вытягивания по сравнению с базовым вариантом достигает 18 % (объем жидкой фазы повышается до 83,6 %), а к моменту извлечения отливки — 16 %. Значительно увеличивается и глубина лунки: от 506 до 590 мм.

При увеличении продолжительности остановки слитка в кристаллизаторе от 20 до 30 с объем жидкой фазы в начале цикла изменяется на 30 %, а к моменту извлечения — на 25 % (рис. 4), глубина лунки уменьшается на 60 мм, т. е. примерно на 10 %. При увеличении продолжительности остановки до 40 с отливка даже на пятом цикле вытягивания полностью затвердевает к моменту извлечения, а на восьмом цикле объем жидкой фазы к моменту извлечения составляет лишь 3,4 %. Причем в обоих случаях интенсивность теплоотвода от отливки принималась наименьшей, т. е.  $\alpha_k = 2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), а  $\alpha_v = 1000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) наиболее существенно на процесс формирования цинковой полосы при горизонтальном непрерывно-шаговом литье влияет продолжительность остановки слитка  $\tau_{ост}$  в кристаллизаторе, в меньшей степени — перегрев расплава, еще в меньшей и примерно одинаковой степени — интенсивность охлаждения кристаллизатора и интенсивность контактного теплообмена между отливкой и кристаллизатором в заданных диапазонах;

2) влияние перегрева расплава уменьшается с увеличением интенсивности контактного теплообмена и охлаждения кристаллизатора;

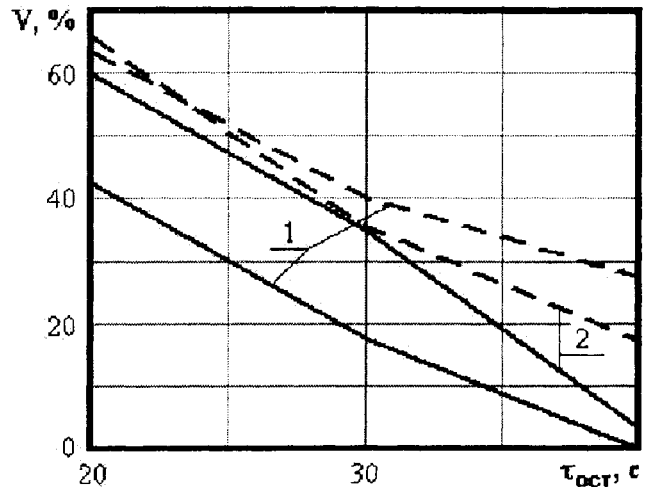


Рис. 4. Изменение объема жидкой фазы при различной продолжительности стадии остановки: 1 — на пятом цикле; 2 — на восьмом цикле; — — — в момент извлечения отливки; — — — в начале цикла (при базовом варианте расчета)

3) изменение начальной температуры кристаллизатора от 100 до 150 °С на процесс формирования отливки влияет незначительно;

4) с целью увеличения производительности процесса установка должна иметь устройство для охлаждения слитка водой после извлечения его из кристаллизатора;

5) исходя из производительности установки и учитывая возможность преждевременного затвердевания питателя, верхним критическим значением по продолжительности остановки слитка является время 30 с;

6) наиболее перспективны условия формирования отливки при интенсивности контактного теплообмена, соответствующей  $\alpha_k = 5000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), интенсивности охлаждения кристаллизатора, соответствующей  $\alpha_v = 2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), и продолжительности остановки слитка в пределах 15 — 25 с.

### Литература

1. Самарский А. А. Введение в численные методы. М.: Высш. шк., 1987.
2. Барановский Э. Ф., Севастьянов П. В. Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1989.