

*In the article there are presented the results of the experimental-theoretical identification of the parameters of contact heat exchange of the process of the continuous horizontal pace casting of zink bar in metal crystallizer with water cooling.*

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

УДК 669.18.046

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОБМЕНА ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНО-ШАГОВОМ ЛИТЬЕ ЦИНКОВОЙ ПОЛОСЫ

Одной из важнейших задач на этапе проектирования установки для литья заготовок цинковых анодов является определение такой ее конструкции, которая обеспечивала бы надлежащие условия теплообмена и питания отливки в течение всего процесса ее формирования. Поэтому необходимо определить эффективные условия охлаждения кристаллизатора, а также условия охлаждения отливки после ее извлечения из кристаллизатора (на стадии вторичного охлаждения). Для этих целей разработан пакет программ [1], реализующий численное решение задач затвердевания и охлаждения отливки, на основе двухмерной математической модели процесса теплообмена. Пакет программ позволяет:

- 1) определять температурные поля в отливке, кристаллизаторе, соединительном стакане, питателе и металлоприемнике на всех стадиях формирования слитка;
- 2) учитывать теплообмен на стадии извлечения отливки, т.е. во время ее движения;
- 3) определять глубину жидкой лунки в осевом сечении отливки на всех стадиях ее формирования;
- 4) определять толщину затвердевшей корки вдоль отливки в осевом сечении;
- 5) определять доли жидкой и твердой фаз в объеме отливки;
- 6) оценивать возможность образования раковины на стадии вторичного охлаждения;
- 7) оценивать влияние газового зазора между формирующейся коркой и рабочей поверхностью кристаллизатора;
- 8) определять время выхода процесса литья на квазистационарный режим.

Задачу формирования отливки при горизонтальном непрерывно-шаговом литье для каждого цикла вытяжки решали в два этапа. На первом этапе решали задачи затвердевания отливки в кристаллизаторе и охлаждения уже извлеченной отливки, на втором этапе — задачи затвердевания

и охлаждения отливки в процессе ее извлечения из кристаллизатора.

На основе использования разработанного пакета программ проведены численные исследования по определению основных закономерностей процесса формирования цинковых полос толщиной 16 мм при непрерывном горизонтальном шаговом литье в металлический кристаллизатор длиной 490 мм [2]. Это позволило оценить влияние условий и интенсивности теплообмена на показатели качества процесса литья при проектировании опытно-экспериментальной установки [3].

В результате исследований установлена степень влияния на кинетику формирования отливки следующих факторов:

- продолжительности стадии останова и извлечения отливки;
- различных условий теплообмена по длине кристаллизатора между его рабочей поверхностью и отливкой на обеих стадиях ее формирования;
- интенсивности и разных условий охлаждения кристаллизатора по его длине;
- интенсивности вторичного водяного охлаждения отливки после ее извлечения;
- перегрева расплава и начальной температуры кристаллизатора.

Использование данного пакета программ для достаточно точной количественной оценки параметров формирующейся отливки и определения оптимальных режимов литья возможно лишь после его адаптации на основе параметрической идентификации математической модели процесса теплообмена.

Методика экспериментально-теоретической идентификации параметров теплообмена включает в себя следующие шаги:

- проведение серии экспериментов с определением динамики изменения температур в местах установки термодатчиков;
- анализ и обработку экспериментальных данных на ПЭВМ;

• поиск значений параметров контактного теплообмена  $\alpha_k$  для всех стадий формирования отливки путем минимизации критерия адекватности экспериментальных и вычисленных значений температур кристаллизатора в точках установки термопар.

Измерения температур проводили с использованием хромель-алюмелевых термопар, изготовленных из проволоки диаметром 0,5 мм с диаметром головки 1,5 мм. Электроды термопар устанавливали на глубине 2 мм от рабочей поверхности кристаллизатора раздельно, что обеспечивает более быстрый подъем температуры, чем при точечной установке электродов, особенно в начальной стадии нагрева [4].

На основании анализа результатов ранее проведенных экспериментов процесса непрерывного горизонтального шагового литья [2, 3] термопары устанавливали в шести точках (рис. 1). Установка термопар  $T_5$  и  $T_6$  в нижней части кристаллизатора напротив термопар  $T_2$  и  $T_4$  обусловлена необходимостью исследования различий в динамике формирования отливки на нижней и верхней поверхностях кристаллизатора. На нижней поверхности корка формируется более устойчиво, чем на верхней, поэтому важно провести сравнительный анализ условий контактного теплообмена на рабочих поверхностях кристаллизатора. Кроме того, по показаниям термопары  $T_6$  можно фиксировать момент начала извлечения очередной отливки длиной  $l$  из кристаллизатора.

Установка термопар  $T_1 - T_4$  обусловлена необходимостью определения зон с различной интенсивностью контактного теплообмена между отливкой и кристаллизатором с целью идентификации параметров теплообмена для каждой из них. В частности, термопара  $T_3$  установлена на границе областей с различной степенью охлаждения кристаллизатора – в одной из них осуществляется водяное охлаждение кристаллизатора, в другой – нет. Динамика изменения температур по

показаниям термопар носит достаточно выраженный пикообразный характер (рис. 2, 3). На стадии остановки происходит интенсивный теплообмен отливки с рабочей поверхностью кристаллизатора, в результате чего его температура увеличивается. При извлечении затвердевшей отливки из кристаллизатора в зоне контакта между ними образуется газовый зазор, что способствует снижению интенсивности теплоотвода от отливки и уменьшению температуры кристаллизатора в данной зоне. Величина зазора неодинакова по длине кристаллизатора. Он больше у выходного отверстия кристаллизатора, о чем свидетельствуют показания термопар. При извлечении отливки полость кристаллизатора постепенно заполняется горячим расплавом, что приводит к увеличению температуры кристаллизатора по мере его заполнения.

Анализ изменения температуры кристаллизатора по показаниям термопар указывает на необходимость идентификации параметра контактного теплообмена по зонам, отличающимся интенсивностью и характером теплообмена между формирующейся отливкой и рабочей поверхностью кристаллизатора, а также для стадий остановки и извлечения отливки, т.е. по длине кристаллизатора и времени. Поэтому решение задачи параметрической идентификации контактного теплообмена для каждой из стадий формирования слитка искали в виде кусочно-постоянной функции.

Выбран режим литья со следующей продолжительностью стадии остановки для каждого из циклов литья: для первого – 20 с, второго – 15, для третьего и всех последующих – 12 с. Продолжительность стадии извлечения для каждого цикла литья принималась равной 10 с. Как показали предварительные расчеты и эксперименты, такой режим обеспечивает достаточное питание отливки в кристаллизаторе на каждом цикле ее формирования и направленность затвердевания отливки. За счет того, что продолжительность извлечения заготовки и продолжительность остановки отливки в кристаллизаторе почти равны, обеспечиваются примерно одинаковые условия затвердевания на обеих стадиях.

Оценку параметров модели проводили по совокупности частных критериев идентификации, которые свертывались в глобальный критерий вида:

$$K(\alpha_k) = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{N_j} \left( \frac{T_{j,pi} - T_{j,ei}}{T_{j,ei}} \right)^2,$$

где  $T_{j,pi}$ ,  $T_{j,ei}$  – соответственно расчетные и измеренные значения температур в месте установки  $j$ -й термопары;  $N_j$  – число измерений для  $j$ -й термопары.

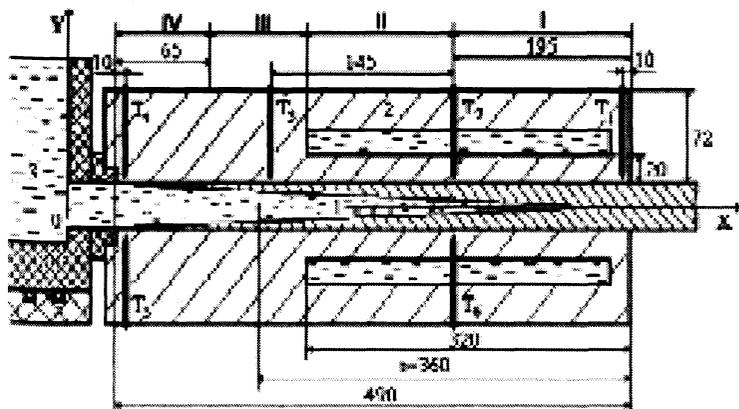


Рис. 1. Схема зон идентификации и установки термопар в кристаллизаторе: I, II, III, IV – зоны идентификации; 1 – отливка; 2 – кристаллизатор; 3 – миксер с расплавом;  $t$  – шаг вытяжки отливки;  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  – термопары

Критерий  $K$  включает в себя отклонения расчетных температур в местах установки термодпар от их значений, измеренных в последовательные моменты времени. Решение задачи идентификации адаптивного параметра  $\alpha_K$  осуществляли путем минимизации критерия  $K$  на основе метода наименьших квадратов и отыскивали в виде постоянных величин для каждой из четырех зон по длине кристаллизатора.

В результате параметрической идентификации определены значения коэффициента контактного теплообмена  $\alpha_K$  между формирующейся отливкой и верхней рабочей поверхностью металлического кристаллизатора:

1) для стадии останковки отливки в кристаллизаторе: 1500 Вт/(м<sup>2</sup>·К) – в первой зоне, 900 – во второй зоне, 1200 – в третьей зоне, 3000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) – в четвертой зоне;

2) для стадии извлечения отливки из кристаллизатора: 1500 Вт/(м<sup>2</sup>·К) – в первой зоне, 1200 – во второй зоне, 1500 – в третьей и 3500 Вт/(м<sup>2</sup>·К) – в четвертой зоне.

Как видно, интенсивность контактного теплообмена на стадиях останковки и извлечения отливки отличается незначительно.

На рис. 2 и 3 показана динамика измеренных и рассчитанных температур кристаллизатора в местах установки термодпар  $T_2$  и  $T_3$  соответственно. Наибольшее отклонение рассчитанных от измеренных значений температур наблюдается на начальных циклах процесса горизонтального непрерывно-шагового литья, так как в этот период градиенты температур на контактной поверхности наибольшие и формирование отливки происходит наименее стабильно.

Анализ полученных результатов свидетельствует о существенном повышении точности математической модели процесса литья вследствие параметрической идентификации теплообмена путем минимизации критерия  $K$ , а также о высокой степени адекватности математической модели. Результаты настоящих исследований использованы при проектировании экспериментальной установки горизонтального непрерывно-шагового литья цинковой полосы толщиной 16 мм. На

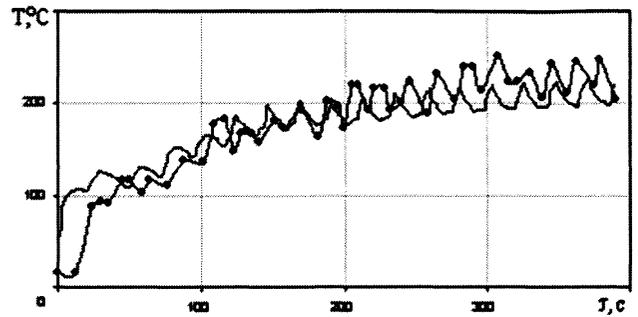


Рис. 2. Изменение температуры кристаллизатора в месте установки термодпары  $T_2$ : ● — измеренная; — по расчету

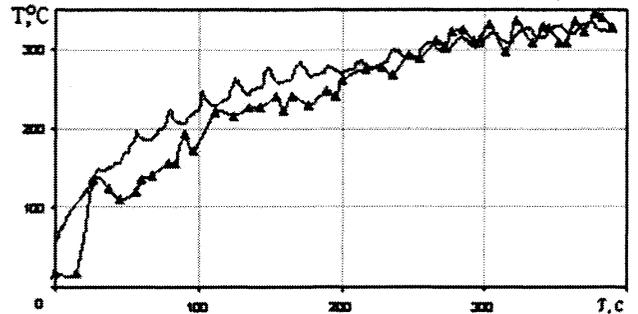


Рис. 3. Изменение температуры кристаллизатора в месте установки термодпары  $T_3$ : ▲ — измеренная; — по расчету

установке изготавливаются цинковые полосы сечением 16,5x80 мм со скоростью 1,0–1,2 м/мин, что в 8–10 раз производительнее литья аналогичных заготовок в кокиль.

### Литература

1. Барановский Э.Ф., Ильюшенко В.М., Пумпур В.А., Петруня Ю.В. Численные исследования формирования цинковой полосы при горизонтальном непрерывно-шаговом литье // Литье и металлургия. 2003. №1. С. 106–109.
2. Барановский Э.Ф., Ильюшенко В.М., Пумпур В.А., Петруня Ю.В. Исследование условий охлаждения при горизонтальном непрерывно-шаговом литье цинковой полосы // Сб. науч. тр. «Металлургия». 2003. №27.
3. Барановский Э.Ф., Ильюшенко В.М., Пумпур В.А., Петруня Ю.В. Установка горизонтального непрерывно-шагового литья // Литье и металлургия. 2003. №3. С. 73–74.
4. Барановский Э.Ф., Севастьянов П.В. Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1989.