

ЛИТЕРАТУРА

1. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
2. *Тонг Л.* Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. М.: Мир, 1969. 344 с.
3. *Юдаев Б.Н.* Теплопередача. М.: Высш. шк., 1973. 360 с.
4. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
5. *Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.* М.: Высш. шк., 2000. 671 с.
6. *Стерман Л.С.* К теории теплообмена при кипении в трубах // ЖТФ. Т. 24. Вып. 2, 1954. С. 250 – 257.
7. *Вейник А.И.* Техническая термодинамика и основы теплопередачи. М.: Металлургия, 1965. 375 с.
8. *Непрерывное литье чугуна / О.А. Баранов, Б.Г. Ветров, В.Б. Поль и др.* М.: Металлургия, 1968. 336 с.
9. *Bernath L. A.* Theory of Local-Boiling Burnout and Its Application to Existing Data, Chem., Eng. Progr. Ser. 1960. V. 56, № 30. P. 95 – 116.
10. *Аладьев И.Т., Доданов И.Д., Удалов В.С.* Конвективный и лучистый теплообмен / Под ред. М.А. Михеева. М.: АН СССР, 1960. С. 79 – 96.
11. *Непрерывное литье намораживанием // В.Ф. Бевза, Е.И. Марукович, З.Д. Павленко, В.И. Туров.* Мн.: Наука и техника, 1979. 208 с.

УДК 669.18.046

Э.Ф. БАРАНОВСКИЙ, канд. техн. наук, **В.М. ИЛЬЮШЕНКО**, канд. техн. наук,
В.А. ПУМПУР, канд. техн. наук, **Ю.В. ПЕТРУНЯ** (ИТМ НАН Беларуси)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНО-ШАГОВОМ ЛИТЬЕ ЦИНКОВОЙ ПОЛОСЫ

Для получения заготовок цинковых анодов под прокатку в ИТМ НАН Беларуси предложен процесс горизонтального непрерывно-шагового литья (ГНЛ) на металлический кристаллизатор с извлечением отливки с шагом t , соответствующим длине заготовки, необходимой для последующей прокатки [1]. Отличительная особенность процесса состоит в том, что время формирования отливки в неподвижном состоянии (стадия остановки) $\tau_{\text{ост}}$ много больше времени ее движения (стадии извлечения) $\tau_{\text{изв}}$. Применение водоохлаждаемого металлического кристаллизатора решает проблему получения достаточно длинных заготовок без отсечек, так как обычно используемый для горизонтального непрерывного литья графитовый кристаллизатор очень дорог, а время его эксплуатации невелико.

С целью разработки рабочих режимов литья заготовок на этапе проектирования одной из важнейших задач является определение такой конструкции литейной машины, которая обеспечивала бы надлежащие условия теплообмена и питания отливки в течение всего процесса ее формирования. Для решения данной задачи необходимо определить эффективные

условия охлаждения кристаллизатора, а также условия охлаждения отливки после ее извлечения из кристаллизатора (на стадии вторичного охлаждения). Для решения этих и других задач теплообмена разработан пакет программ [1], позволяющий осуществить численное решение задачи затвердевания и охлаждения отливки на основе двухмерной математической модели процесса теплообмена. Пакет программ дает возможность:

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.

Решение задачи формирования отливки при горизонтальном непрерывно-шаговом литье для каждого цикла вытяжки осуществлялось в два этапа. На первом этапе решались две задачи – затвердевания отливки в кристаллизаторе и охлаждения уже извлеченной отливки, на втором этапе – задача затвердевания и охлаждения отливки в процессе ее извлечения из кристаллизатора.

Расчеты выполнялись для отливки длиной 360 мм и толщиной 16 мм, затвердевающей в кристаллизаторе длиной 490 мм. В качестве базового был принят вариант расчета при следующих начальных значениях факторов: продолжительность остановки слитка в кристаллизаторе $\tau_{\text{ост}} = 20$ с, время извлечения слитка $\tau_{\text{изв}} = 3$ с, значение коэффициента контактного теплообмена между отливкой и рабочей поверхностью кристаллизатора $\alpha_{\text{к}} = 2000$ Вт/(м²·К) [2], значение коэффициента теплообмена кристаллизатора с водой $\alpha_{\text{к.в}} = 2000$ Вт/(м²·К), значение коэффициента теплообмена отливки с водой на стадии вторичного охлаждения принималось равным 2000 Вт/(м²·К).

Как показали предварительные расчеты [1], процесс формирования отливки при постоянных условиях теплообмена на рабочей и водоохлаждаемой поверхности кристаллизатора выходит на квазистационарный режим на седьмом-восьмом цикле вытяжки. В это время температура рабочей поверхности кристаллизатора достигает некоторой верхней границы, а жидкая лунка в осевом сечении отливки может выйти за пределы кристаллизатора. В результате при неудовлетворительных условиях охлаждения слитка возможно как образование раковины в нем, так и разрыв слитка на стадии вторичного охлаждения вследствие подплавления корки изнутри (рис. 1). В связи с этим исследовалось влияние интенсивности охлаждения кристаллизатора водой $\alpha_{\text{к.в}}$, протяженности зоны вторичного водяного охлаждения отливки z и его интенсивности $\alpha_{\text{о.в}}$ на изменение доли твердой

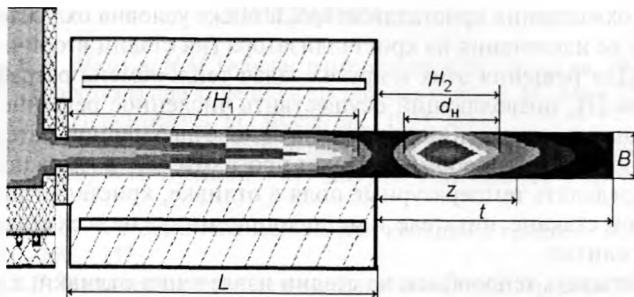


Рис. 1. Выход жидкой лунки за пределы кристаллизатора и образование раковины (t – шаг вытяжки; L – длина кристаллизатора; B – толщина отливки; H_1 – глубина жидкой лунки на стадии затвердевания; H_2 – глубина жидкой лунки на стадии вторичного охлаждения отливки; d_H – ширина раковины; z – длина зоны водяного охлаждения)

фазы Ψ в объеме отливки и глубины жидкой лунки в осевом сечении отливки на стадии затвердевания H_1 и на стадии вторичного охлаждения H_2 , а также на развитие раковины в отливке. Контроль за развитием раковины на стадии вторичного охлаждения проводили на основе анализа изменения ее ширины d_H в осевом сечении.

В табл. 1 представлены некоторые результаты численных экспериментов: доля твердой фазы и глубина жидкой лунки в отливке в начале затвердевания в кристаллизаторе и перед ее извлечением (Ψ_1 и H_1 соответственно); доля твердой фазы и глубина жидкой лунки в извлеченной отливке в начале и в конце стадии вторичного охлаждения (Ψ_2 и H_2) в те же моменты времени. В последнем столбце приведены результаты анализа изменения жидкого ядра отливки на стадии вторичного охлаждения. Значение коэффициента теплообмена $\alpha_{0,в}$, равное $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, соответствует теплообмену поверхности слитка с воздухом, а в остальных случаях – с водой.

Таблица 1

Результаты численных исследований влияния условий охлаждения

$\alpha_{0,в}$, Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{0,ж}$, Вт/(м ² ·К)	z, мм	В начале стадии затвердевания			Перед извлечением отливки			Наличие дефектов
			Ψ_1 , %	Ψ_2 , %	H_1 , мм	Ψ_1 , %	Ψ_2 , %	H_1 , мм	
2000	10	0	16	56,3	162	58,4	60,1	363	Разрыв
5000	10	0	21,3	63,6	153	67,7	67,6	282	То же
2000	2000	100	16,3	79,6	159	58,4	96,2	363	«
5000	2000	100	21,6	89,5	148	67,7	100	282	Раковина
2000	5000	100	16,6	90,1	155	58,4	100	363	То же
5000	5000	100	21,8	98	138	67,7	100	282	–
2000	2000	200	16,3	88,9	153	58,4	100	363	–
5000	2000	200	21,6	96,1	108	67,7	100	282	–
2000	5000	200	16,6	98	68	58,4	100	363	–
2000	2000	300	16,3	88,9	153	58,4	100	363	–



Рис. 2. Изменение глубины лунки при различной интенсивности охлаждения кристаллизатора и отливки:

1 — H_1 ; 2 — H_2 ; — — — при $\alpha_{к.л} = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и $\alpha_{о.в} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $z = 100 \text{ мм}$; —◆— при $\alpha_{к.л} = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $\alpha_{о.в} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $z = 100 \text{ мм}$; —▲— при $\alpha_{к.л} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $\alpha_{о.в} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $z = 100 \text{ мм}$

Как показали результаты расчетов, лунка глубиной H_1 в начале стадии остановки, т. е. сразу после извлечения очередной отливки и поступления расплава в полость кристаллизатора, выходит за его пределы во всех рассматриваемых случаях, а при вторичном охлаждении извлеченной отливки на воздухе лунка длиной H_2 достигает критических размеров (рис. 2), что в совокупности и приводит к подплавлению формирующейся отливки изнутри и ее разрыву. Раковина появляется в тех случаях, когда не обеспечивается направленное затвердевание отливки вдоль ее оси, в частности при охлаждении водой узкого «перешейка» вблизи кристаллизатора ($z = 100 \text{ мм}$) и недостаточно интенсивном теплоотводе от отливки на всех стадиях ее формирования.

По результатам проведенных численных исследований наилучшими можно считать условия литья при ширине зоны вторичного охлаждения не менее 200 мм, когда при любой (из выбранного диапазона) интенсивности охлаждения извлеченная отливка полностью затвердевает в зоне вторичного охлаждения, а доля твердой фазы Ψ_1 слитка в кристаллизаторе перед его извлечением составляет от 58 до 67%. Такого количества твердой фазы достаточно для обеспечения устойчивости процесса получения цинковой отливки.

Результаты настоящего исследования использованы при проектировании установки горизонтального непрерывно-шагового литья цинковой полосы толщиной 16 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Численные исследования формирования цинковой полосы при горизонтальном непрерывно-шаговом литье / Э.Ф. Барановский, В.М. Ильюшенко, В.А. Пумпур, Ю.В. Петруня // Литье и металлургия. 2003. № 1. С. 106 — 109.
2. Барановский Э.Ф., Севастьянов П.В. Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1989. 189 с.