

Е.И. МАРУКОВИЧ, д-р техн. наук, В.Ф. БЕВЗА, канд. техн. наук,
С.Р. ЧУДАКОВ (ИТМ* НАН Беларуси)

ТЕПЛООБМЕН НА ВОДООХЛАЖДАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛИЗАТОРА ПРИ НЕПРЕРЫВНО-ЦИКЛИЧЕСКОМ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ

Эффективность непрерывных способов литья во многом определяется ресурсом работы кристаллизатора. Существенное влияние на его стойкость оказывает режим охлаждения рабочей втулки. При непрерывно-циклическом литье намораживанием (НЦЛН) используются кристаллизаторы скольжения гильзового типа, которые содержат нижний и верхний коллекторы, соединенные кольцевым каналом, расположенным между наружной (охлаждаемой) поверхностью рабочей втулки и стенкой кожуха. Кристаллизатор охлаждается в режиме вынужденного движения воды. Характер взаимодействия рабочей втулки и охлаждающей жидкости именно в кольцевом канале определяет условия теплообмена на ее охлаждаемой поверхности.

Характер взаимодействия нагретой поверхности и охлаждающей среды определяется уровнем температуры этой поверхности и законом ее изменения. При НЦЛН кристаллизатор испытывает циклические тепловые воздействия со стороны внутренней поверхности рабочей втулки с периодом, равным времени формирования отливки. При этом в каждом цикле происходит последовательный односторонний нагрев и охлаждение стенок рабочей втулки, т. е. возникают периодические колебания температуры, или температурные волны. В связи с тем что тепловые воздействия на внутреннюю поверхность кристаллизатора повторяются достаточно длительное время (в течение всей разливки), имеет место установившийся стационарно-периодический процесс, причем величина температурных колебаний не остается постоянной по толщине стенки. Эти колебания имеют максимальное значение на внутренней поверхности и уменьшаются по мере удаления от нее. На водоохлаждаемой поверхности колебания температуры минимальны либо полностью затухают (рис. 1). Глубина проникновения температурной волны определяется теплофизическими характеристиками материала кристаллизатора и режимными параметрами литья. Толщина слоя заметного колебания температуры будет тем значительнее, чем больше коэффициент теплопроводности материала и продолжительнее период колебаний температуры на внутренней поверхности, т. е. чем меньше частота извлечения отливок. Например, при литье чугуна в кристаллизатор со стальной рабочей втулкой и толщиной стенки более 12 мм колебания температуры наружной поверхности втулки не превышают 15% от колебаний на внутренней поверхности. При этом, если

* Институт технологии металлов.

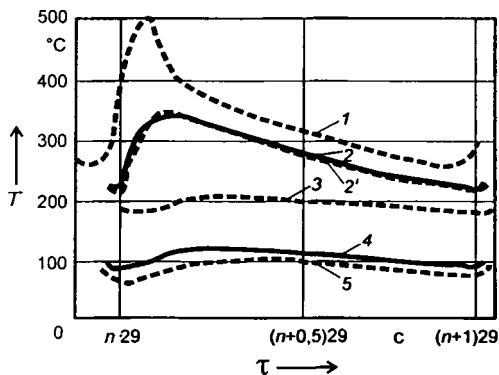


Рис. 1. Изменение температуры стальной стенки кристаллизатора в течение одного цикла: 1 – на рабочей поверхности; 2, 2' – на расстоянии 1,9 мм от рабочей поверхности; 3, 4 – на расстоянии соответственно 6,2 мм и 11,5 мм; 5 – на водоохлаждаемой поверхности; — эксперимент; ---- расчет

температура водоохлаждаемой поверхности не превышает температуру насыщения воды (T_s), отвод теплоты происходит только за счет конвекции и теплопроводности. В этом случае при турбулентном режиме движения воды в кольцевом канале для расчета среднего коэффициента теплоотдачи ($\bar{\alpha}_3$) можно использовать выражение [1]

$$\bar{Nu} = 0,021 Re^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \epsilon_l, \quad (1)$$

где $\bar{Nu} = \frac{\bar{\alpha}_3}{\lambda_b} d_{эк}$ – критерий Нуссельта; λ_b – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К); $d_{эк}$ – эквивалентный диаметр, м; $Re = W_B d_{эк} / \nu_B$ – критерий Рейнольдса; W_B – скорость движения воды, м/с; ν_B – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с; $Pr = \nu_B / a_B$ – критерий Прандтля; a_B – коэффициент температуропроводности воды, м²/с; $\epsilon_l = fl/D_1$; Re – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине канала; l, D_1 – соответственно длина и диаметр кристаллизатора, м.

Физические константы жидкости в формуле (1) определяются при средней по длине канала температуре

$$\bar{T}_B = (T_{вх} + T_{вых})/2,$$

где $T_{вх}, T_{вых}$ – температура воды соответственно на входе и выходе из кристаллизатора.

Критерий Pr_c определяется при температуре водоохлаждаемой поверхности стенки кристаллизатора. Отношение $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$ учитывает влияние направления теплового потока.

По формуле (1) можно рассчитывать теплоотдачу для гладких труб любой формы поперечного сечения: круглого, квадратного, прямоугольного, кольцевого ($D_3/D_2 = 1,0 \dots 5,6$), для всех упругих и капельных жидкостей при $1 \cdot 10^4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ и $0,6 \leq Pr_{ж} \leq 2500$ [1]. Конструкции используемых при НШЛН кристаллизаторов и режимы их охлаждения обеспечивают следующие значения критериев: $Re \geq 1,7 \cdot 10^4$; $3 \leq Pr_{ж} \leq 10$; $D_3/D_2 = 1,02 \dots 1,15$. Таким образом, значения ограничивающих параметров находятся в области применимости формулы (1).

Например, расчет коэффициента теплообмена по формуле (1) для стального кристаллизатора диаметром $D_1 = 110$ мм с толщиной стенки рабочей втулки 12,85 мм и высотой 260 мм дает следующий результат: $\overline{Nu} = 177,027$; $\overline{\alpha}_3 = 18,057 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К).

Интенсивность теплоотдачи на водоохлаждаемой поверхности кристаллизатора может быть определена также по плотности теплового потока (\overline{q}_3):

$$\alpha_3 = \overline{q}_3 / (T_3 - T_B).$$

Среднюю величину \overline{q}_3 можно определить по температурному полю кристаллизатора или по изменению теплосодержания охлаждающей воды. Например, для стального кристаллизатора с теми же геометрическими параметрами средняя плотность теплового потока на водоохлаждаемой поверхности, рассчитанная по температурному полю, составляет $6,46 \cdot 10^5$ Вт/м². В этом случае средняя интенсивность теплоотвода $\overline{\alpha}_3 = 15,76 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К). Расхождение со значением $\overline{\alpha}_3$, полученным по формуле (1), не превышает 13%.

Мы рассмотрели теплообмен водоохлаждаемой поверхности с охлаждающей средой при $T_3 < T_s$, т. е. для условий конвективного теплообмена при вынужденном движении жидкости. В случае, когда $T_3 > T_s$ (рис. 2), мо-

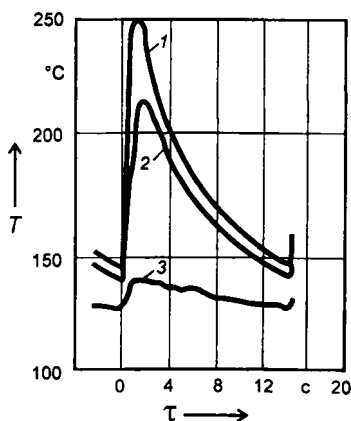


Рис. 2. Изменение температуры медной стенки кристаллизатора в течение одного цикла: 1 — на расстоянии 1,2 мм от рабочей поверхности; 2 — 3,0 мм; 3 — 9,0 мм

жет иметь место теплообмен при кипении. Отвод теплоты в режиме пузырькового кипения является одним из наиболее совершенных методов охлаждения поверхности нагрева. Перевод жидкости в такой режим обеспечивает существенное увеличение коэффициента теплоотдачи. Следует указать, что охлаждение кристаллизаторов в режиме пленочного или частично пленочного кипения недопустимо.

Интенсивное перемешивание слоя жидкости, прилегающего к поверхности нагрева (называемое микроконвекцией), обеспечивает отличные характеристики теплоотдачи при кипении. Именно этот процесс конвекции является определяющим в передаче почти всего количества теплоты от поверхности нагрева. А количество теплоты, передаваемой за счет переноса скрытой теплоты парообразования, составляет всего около 2% общего теплового потока [2].

При пузырьковом кипении теплота от поверхности нагрева к жидкости передается посредством следующих механизмов [2]:

- 1) теплообмен между жидкостью и паром, вызываемый перемешиванием пограничного слоя пузырями (микроконвекция);
- 2) перенос теплоты путем конвекции в однофазной среде в промежутках между участками, занятыми пузырями;
- 3) перенос теплоты пузырями в виде теплоты парообразования;
- 4) перенос теплоты путем непрерывного испарения у основания пузыря и конденсации у его вершины, когда пузырь все еще прикреплен к стенке.

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_3$ при пузырьковом кипении в условиях вынужденного движения жидкости можно определить по формуле [3, 4]

$$\frac{\bar{\alpha}_3}{\alpha_0} = \sqrt[n]{1 + \left(\frac{\alpha_{00}}{\alpha_0}\right)^n},$$

где α_0 , α_{00} – коэффициент теплоотдачи к вынужденному потоку соответственно некипящей жидкости и при развитом кипении, когда скорость вынужденного потока кипящей жидкости уже не оказывает на него влияния.

При скоростях движения воды от 0,5 до 6,7 м/с и тепловых потоках от $2 \cdot 10^5$ до $10 \cdot 10^5$ Вт/м² $n = 2$. Величину α_{00} для двухфазного потока, в котором объемное паросодержание меньше 0,7, определяют по формуле

$$\alpha_{00} = Cq^{0,7},$$

где C – множитель пропорциональности, зависящий от давления [3]:

$p, 10^5 \text{ Н/м}^2$	10	20	40	80	140
C	3,2	3,7	4,3	6,4	11,2

Аналогичная формула для определения $\bar{\alpha}_3$ предложена в работе [5]. При этом α_{00} предлагается определять по формулам:

$$\alpha_{00} = \frac{3,4 p^{0,18}}{1 - 0,0045 p} q^{2/3}; \quad (2)$$

$$\alpha_{00} = 0,316 \Delta T_s^{2,33} p^{0,5}. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) рекомендуется применять в диапазоне давлений $(1...40) \cdot 10^5$ Па.

Коэффициент α_0 рассчитывают по уравнениям конвективного теплообмена без кипения при $W_B = 4G/(\rho' \pi d^2)$, где G – массовый расход паро-жидкостной смеси [5].

Интенсивность теплообмена при вынужденном движении жидкости в случае развитого пузырькового кипения можно рассчитать также по формуле [6]

$$Nu_k = 6150 Nu \left[\frac{q_{3n}}{r' \gamma'' W_B} \left(\frac{\gamma''}{\gamma'} \right)^{1,45} \left(\frac{r'}{c_p T_s} \right)^{0,33} \right]^{0,7}, \quad (4)$$

где Nu – критерий Нуссельта при вынужденной конвекции без кипения; r' – теплота парообразования; γ'' , γ' – удельный вес пара и воды соответственно; c_p – удельная теплоемкость воды.

Формулой (4) можно пользоваться, если комплекс в квадратных скобках больше $0,4 \cdot 10^{-5}$. Если это условие не соблюдается, то интенсивность теплообмена определяют по формуле (1).

Заметное влияние на интенсивность теплообмена при кипении жидкости оказывают скорость протекания жидкости и тепловая нагрузка. При этом установлено, что при больших скоростях движения жидкости интенсивность теплоотдачи при кипении почти такая же, как и в случае конвективного теплообмена. Например, если плотность теплового потока $q_3 = 4,6 \cdot 10^5$ Вт/м² и $W_B = 1,0$ м/с при конвективной теплоотдаче $\alpha_3 = 8 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К), то в случае теплоотдачи при кипении $\alpha_3 = 18 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К). При скорости $W_B = 6$ м/с $\alpha_3 = 37 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К) в случае вынужденной конвекции и $\alpha_3 = 40 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К) в случае кипения [7]. Это можно объяснить, видимо, тем, что поток жидкости срывает такие мельчайшие пузырьки пара, образование и движение которых уже не оказывает существенного влияния на интенсивность теплообмена.

Наибольший интерес для практики непрерывного литья представляет процесс кипения в условиях вынужденного движения жидкости, недогретой до температуры насыщения. По данным [8], развитое пузырьковое кипение в этих условиях наблюдается при температуре греющей поверхности, превышающей температуру насыщения не более чем на 40...50 К.

Для определения температуры поверхности водоохлаждаемой поверхности, при которой имеет место развитое пузырьковое кипение в условиях НЦЛН, можно воспользоваться формулой Берната, выведенной им на основании анализа данных Колумбийского университета, полученных в установке с алюминиевым нагревателем в кольцевом канале с водой [2, 9]:

$$T_3 = 1,8 \left[57 \ln P - 54 \left(\frac{p}{p+15} \right) - \frac{W_B}{4} \right] + 32, \quad (5)$$

где T_3 – температура, F; p – давление в системе, фунт/дюйм²; W_b – скорость теплоносителя, фут/с.

При расчете T_3 по формуле (5) значения входящих в нее параметров следует подставлять в британской системе единиц. Эта формула справедлива в следующих интервалах параметров недогретой воды и для следующих геометрических характеристик: геометрия – труба круглого сечения, каналы прямоугольного и кольцевого сечения; $p = 23...3000$ фунт/дюйм² (1,6...211 атм); $W_b = 4,0...54,0$ фут/с (1,22...16,5 м/с).

Температуру T_3 , обеспечивающую развитое пузырьковое кипение, можно определить также по плотности теплового потока q_3 [10]:

$$T_3 = 100 \left[1 + 6,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{10^{-6} q_3 r'}{\lambda_b T_s} \right)^{0,23} \left(\frac{r'}{c_b T_s} \right)^{0,9} \right]. \quad (6)$$

Расчет температуры водоохлаждаемой поверхности T_3 по приведенным формулам дает следующий результат: по формуле (5) $T_3 = 145$ °С; по формуле (6) $T_3 = 131$ °С.

Следует отметить хорошее совпадение результатов расчета по формулам (5) и (6), полученных различными авторами и определяющих зависимость T_3 от разных параметров. Расхождение не превышает 10%.

Как видим, для обеспечения развитого пузырькового кипения на водоохлаждаемой поверхности кристаллизатора ее температура должна быть не менее 130 °С. В реальных условиях непрерывно-циклического литья чугуна в стальной кристаллизатор значение температуры на этой поверхности составляет около 100 °С (см. рис. 1). Если температура поверхности иногда и превышает 100 °С, то это превышение составляет не более 10 °С и сохраняется в течение не более одной трети времени затвердевания отливки (продолжительности цикла). Кроме того, следует учитывать, что температура кипения воды повышается с увеличением давления. Например, при избыточном давлении в 1 атм температура кипения воды возрастает до 120 °С [1]. В системе охлаждения кристаллизатора, в том числе и в кольцевом канале, всегда имеет место избыточное давление воды, которое может составлять от десятых долей атмосферы до 1 атм и более. В связи с этим при непрерывно-циклическом литье чугуна в стальной кристаллизатор не обеспечиваются условия даже для частично пузырькового кипения на водоохлаждаемой поверхности, а тем более для развитого.

При литье чугуна в медный кристаллизатор средняя температура водоохлаждаемой поверхности составляет более 130 °С (см. рис. 2), т. е. на этой поверхности имеет место развитое пузырьковое кипение.

Приведенную методику можно использовать для приблизительной оценки условий теплоотдачи от водоохлаждаемой поверхности кристаллизатора к охлаждающей среде. В реальных условиях непрерывно-циклического литья чугуна колебания плотности теплового потока $q_3(\tau)$ на водоохлаждаемой поверхности имеют, как правило, значительную величину и пользование средними значениями \bar{q}_3 , $\bar{\alpha}_3$ может привести к существенным погрешностям. В связи с этим анализ условий теплообмена необходи-

мо проводить с учетом пульсирующего характера изменения температуры стенки кристаллизатора и плотности теплового потока на его поверхностях. Изменение $q_3(\tau)$ в течение цикла определяли по формулам, полученным с использованием гармонического анализа [11] либо по формуле

$$q_3(\tau) = \frac{\lambda_2[\theta_2(\tau) - \theta_1(\tau)]}{X_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2}\right)} + \frac{X_2 \lambda_2}{2a_2 \left(1 - \frac{X_2}{2R_2}\right)} \frac{d\theta_2(\tau)}{dt},$$

где λ_2 , a_2 — коэффициенты соответственно теплопроводности и температуропроводности материала кристаллизатора; $\theta_1(\tau) = T(R_1; \tau)$, $\theta_2(\tau) = T(R_2; \tau)$ — измеренные температуры; R_1 , R_2 — радиусы установки термодпар соответственно вблизи рабочей и водоохлаждаемой поверхностей.

Формула получена путем решения обратной нестационарной задачи теплопроводности по показаниям термодатчиков, установленных вблизи рабочей и охлаждаемой поверхностей.

Например, при колебании плотности теплового потока в течение цикла от $4,6 \cdot 10^5$ до $7,2 \cdot 10^5$ Вт/м² изменение $\alpha_3(\tau)$ происходит в пределах от $10,9 \cdot 10^3$ до $13,2 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К) (рис. 3). При литье в медный кристаллизатор изменения $\alpha_3(\tau)$ в течение цикла происходят в значительно больших пределах. Разность между максимальным и минимальным значениями $\alpha_3(\tau)$ может составлять более $100 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К).

Таким образом, при циклических тепловых воздействиях на внутреннюю поверхность кристаллизатора теплоотдача от водоохлаждаемой поверхности к охлаждающей среде имеет пульсирующий характер, соответствующий изменению плотности теплового потока, и при НЦЛН чугуна в стальной кристаллизатор теплообмен осуществляется практически только в режиме вынужденной конвекции, а при литье в медный кристаллизатор — в режиме пузырькового кипения.

Полученные результаты позволяют наметить пути управления процессом теплообмена с целью оптимизации тепловых условий работы кристаллизатора и интенсивности теплоотвода от затвердевающей отливки.

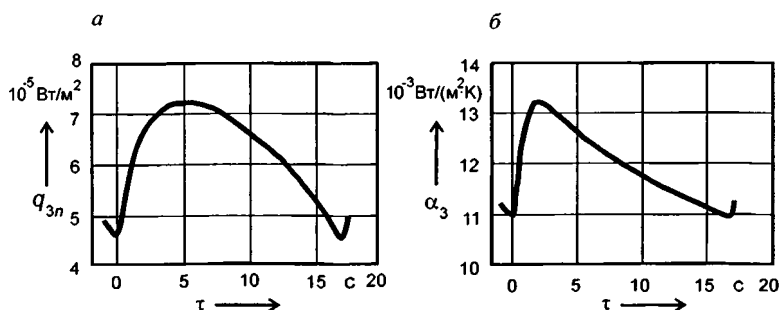


Рис. 3. Изменение плотности теплового потока (а) и коэффициента теплоотдачи (б) на водоохлаждаемой поверхности стального кристаллизатора в течение одного цикла

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