



The kinetics of the casting hardening is studied at example of vertical moulding of solid cylindrical casting of cast iron with diameter 0,1 m.

Е. И. МАРУКОВИЧ, ИТМ НАН Беларуси, Е. Б. ДЕМЧЕНКО, БИТУ

УДК 621.74.047

## КИНЕТИКА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВКИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ С ЗАКРЫТЫМ УРОВНЕМ

Комбинированные кристаллизаторы, состоящие из кожуха охлаждения и сменных графитовых вкладышей, используются для получения заготовок из черных и цветных металлов и сплавов как при горизонтальном литье, так и при вертикальном литье с закрытым уровнем [1]. Существенным преимуществом и особенностью их использования является возможность создания охлаждаемой и неохлаждаемой (обогреваемой) зон графитового вкладыша [2], что обеспечивает соединение кристаллизатора с металлоприемником или литниковой системой в схемах литья с закрытым уровнем без применения переходных стаканов.

Процесс формирования отливки в комбинированных кристаллизаторах с графитовым вкладышем во многом определяется теплофизическими свойствами графита и наличием термического сопротивления зазора на границе контакта системы «графитовый вкладыш–стальная втулка». Чтобы снизить термическое сопротивление, необходимо обеспечить плотный контакт вкладыша и втулки, который зависит от точности выполнения конусных поверхностей, их тщательной подгонки и притирки, а также от степени коробления стальной втулки в процессе эксплуатации.

Кинетику затвердевания отливки изучали на примере вертикального литья сплошной цилиндрической отливки из чугуна диаметром 0,1 м. Температурный режим комбинированного кристаллизатора исследовали методом термического анализа. Кристаллизатор имел конусообразные стальную рабочую втулку толщиной  $(5,2-8,3) \cdot 10^{-3}$  м и графитовый вкладыш толщиной  $(11,3-8,2) \cdot 10^{-3}$  м. Длина охлаждаемой и обогреваемой зон кристаллизатора 0,2 и 0,1 м. Термопары располагали в графитовом вкладыше и стальной втулке (рис. 1) в трех поясах на расстояниях 0,01, 0,1 и 0,19 м от начала охлаждаемой зоны графита. Технологические параметры: скорость литья  $w_{cp} = 0,6 \cdot 60^{-1}$  м/с, темпе-

ратура заливки  $T_{зал} = 1360$  °С, скорость протекания воды в кожухе охлаждения  $w_{в} = 3,0$  м/с, расчетное время формирования отливки в кристаллизаторе  $t = 20$  с.

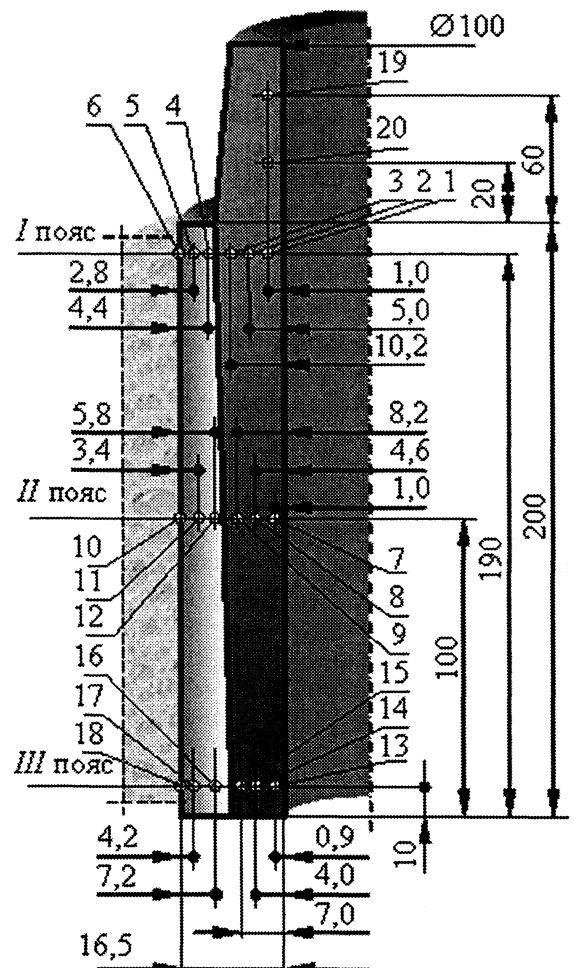


Рис. 1. Схема установки термпар в комбинированном кристаллизаторе: 1–20 – номер термпары

Температурный режим  $T=f(t)$  и мгновенное распределение температуры по толщине графитово-

го вкладыша и стальной втулки  $T=f(X)$  в различных зонах кристаллизатора показаны на рис. 2, 3.



Рис. 2. Температурный режим комбинированного кристаллизатора: а – I пояс; б – II пояс; в – III пояс термопар; 1–20 – номер термопары

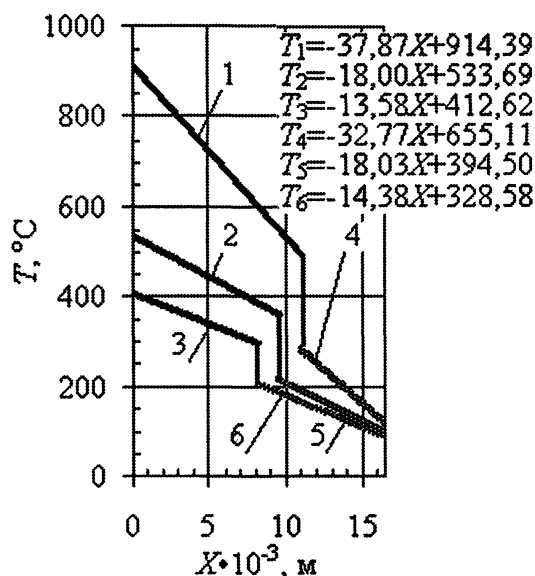


Рис. 3. Распределение температуры по толщине графитового вкладыша (1–3); стальной втулки (4–6); 1, 4 – I пояс; 2, 5 – II пояс; 3, 6 – III пояс

Анализ температурного режима кристаллизатора показал следующее. Температура хвостовика графитового вкладыша в обогреваемой зоне на удалении  $(30-40) \cdot 10^{-3}$  м от зоны охлаждения (рис. 2, а, термопара 19) на протяжении всего времени литья оставалась практически постоянной 1150–1160 °С, выше температуры кристаллизации расплава. На расстоянии  $20 \cdot 10^{-3}$  м (термопара 20) температура рабочей поверхности вкладыша составила 1070–1090 °С, что ниже температуры кристаллизации. Наблюдаемый уровень и изменение температуры при циклическом извлечении

отливки свидетельствуют о том, что в зоне ниже хвостовика графитовой втулки начинается процесс кристаллизации корки отливки.

В зоне формирования начальной корки отливки (I пояс) имела место достаточно четкая периодичность изменения температуры во времени в соответствии с циклом вытяжки. На рабочей поверхности графитового вкладыша максимальная температура достигала 930 °С (термопара 1) при весьма внушительном перепаде температур порядка 130 °С. На поверхности стальной втулки максимальные значения температуры составили 290 °С (термопара 4). Еще более высокий перепад температуры, более 200 °С, наблюдался в зазоре между графитовым вкладышем и стальной втулкой (термопары 3, 4). Однако по мере удаления вглубь от рабочей поверхности кристаллизатора абсолютные значения и перепад температур снижались. Колебания температуры в стальной втулке составили не более 15–20 °С. Температура водоохлаждаемой поверхности втулки была несколько выше температуры кипения охлаждающей воды – 114 °С (термопара 6). Градиент температур по толщине вкладыша составил  $38 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{м} \cdot 10^{-3})$ , по толщине втулки –  $34 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{м} \cdot 10^{-3})$ .

В зоне периодического контакта корки и поверхности кристаллизатора, а также в зоне выхода отливки (II и III пояса) максимальные значения температуры на поверхности вкладыша не превышали 535 и 410 °С (термопары 7, 13). Колебания температуры составили соответственно 175 и 120 °С. Для втулки максимальные значения температуры поверхности достигли 220 и 210 °С (термопары 10, 16). Перепад температур в зазоре в

соответствующих поясах кристаллизатора составил 140 и 90 °С. Градиенты температур по вкладышу (13–18)°С/(м·10<sup>-3</sup>) и втулке (14–18)°С/(м·10<sup>-3</sup>) незначительны, что более чем в 2 раза ниже, чем в зоне формирования начальной корки отливки.

Таким образом, очевидна общая тенденция изменения температурного режима по высоте кристаллизатора. Достаточно ощутимые, относительно влияния на процесс кристаллизации отливки, температурные перепады, связанные с циклическим извлечением отливки, имели место в зоне формирования начальной корки. По мере формирования начальной корки и образования зазора между отливкой и кристаллизатором температура поверхности кристаллизатора снижалась.

Используя мгновенные температуры по толщине вкладыша и втулки  $T=f(X)$ , определяли удельные тепловые потоки, отводимые с поверхности отливки к охлаждающей среде в зависимости от времени ее формирования по методике [3]:

$$q^r = \frac{\lambda^r (T_{2n}^r - T_{3n}^r)}{R_{2n}^r \ln \frac{R_{2n}^r}{R_{3n}^r}},$$

$$q^c = \frac{\lambda^c (T_{2n}^c - T_{3n}^c)}{R_{2n}^c \ln \frac{R_{2n}^c}{R_{3n}^c}},$$

где  $\lambda^r, \lambda^c$  – коэффициенты теплопроводности графита и стали, выбраны в зависимости от рабочего интервала температур по данным работ [4, 5];  $T_{2n}^r, T_{3n}^r, T_{2n}^c, T_{3n}^c$  – температуры внутренней и наружной поверхностей графитового вкладыша и стальной втулки;  $R_{2n}^r, R_{3n}^r, R_{2n}^c, R_{3n}^c$  – радиусы внутренней и наружной поверхностей графитового вкладыша и стальной втулки.

Истинные удельные тепловые потоки, проходящие через наружные поверхности вкладыша и втулки, рассчитывали по аналогичным формулам, в которые вместо  $R_{2n}$  перед значениями логарифмов подставляли значения  $R_{3n}^r$  и  $R_{3n}^c$ . При правильном определении температур поверхностей вкладыша и втулки расчетные значения удельных тепловых потоков  $q^r$  и  $q^c$  должны быть достаточно близки. Сравнение потоков по вкладышу  $q^r$  и втулке  $q^c$  показало достаточно хорошее совпадение результатов. Поэтому расчеты удельного теплового потока проводили по значениям температур в стальной втулке, где показания температур более надежны и стабильны, а установка термомпар проще, чем в графите.

Зависимости удельного теплового потока, отводимого с поверхности отливки к охлаждающей среде по толщине в различных зонах кристаллизатора  $q^c=f(X)$ , а также во времени  $q^c=f(t)$ , рассчитанные по температурному режиму стальной втулки, представлены на рис. 4, а, б.

Установлено (рис. 4, а), что в зоне формирования начальной корки (I пояс) на внутренней рабочей поверхности комбинированной стенки удельный тепловой поток имел максимальное значение  $q^c=2,47$  МВт/м<sup>2</sup>. По мере движения отливки вниз, в зону периодического контакта корки и кристаллизатора (II и III пояса), вследствие усадки и образования газового зазора тепловой поток резко снижался до  $q^c=1,34$  МВт/м<sup>2</sup> и на выходе из кристаллизатора составил  $q^c=1,06$  МВт/м<sup>2</sup>. Аналогичный характер изменения удельного теплового потока наблюдался и со стороны наружной водоохлаждаемой поверхности стальной втулки: соответственно в зоне формирования начальной корки  $q^c < 2$  МВт/м<sup>2</sup>, а на выходе из кристаллизатора  $q^c=0,80$  МВт/м<sup>2</sup>.

Используя полиномиальную аппроксимацию, определили область максимального теплоотвода в комбинированном кристаллизаторе, которая расположена в обогреваемой зоне хвостовика (термопара 20), что несколько выше I пояса термомпар (рис. 4, б). Расчетный удельный тепловой поток в начальный момент формирования корки здесь составил  $q^c=2,68$  МВт/м<sup>2</sup>. Однако уже через 10–15 с поток резко снизился практически вдвое (до  $q^c=1,34$  МВт/м<sup>2</sup>) и в зоне выхода отливки из кристаллизатора составил  $q^c=1,03$  МВт/м<sup>2</sup>.

По значениям удельного теплового потока во времени  $q^c=f(t)$ , используя математическую модель [6], рассчитали зависимость толщины корки

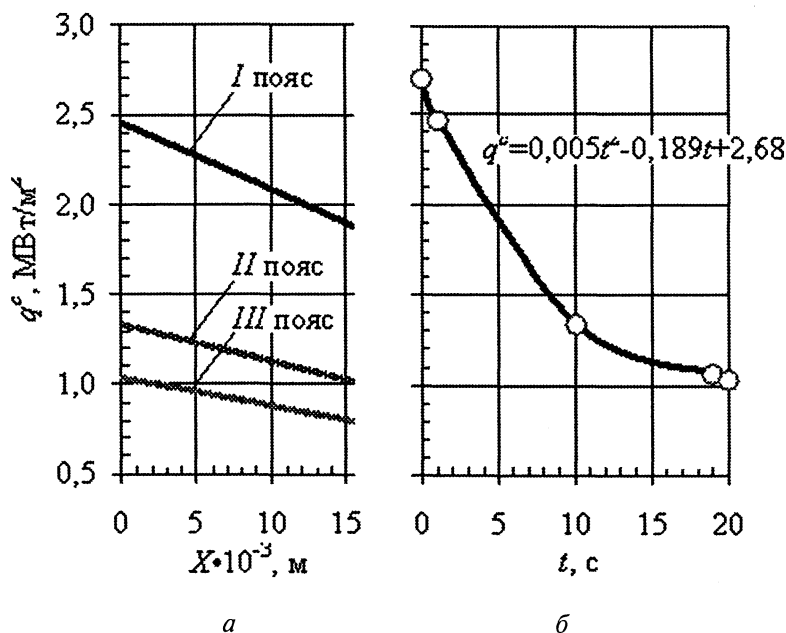


Рис. 4. Значения удельного теплового потока  $q^c$ : а – по толщине комбинированной стенки; б – от времени формирования отливки

отливки от времени формирования в кристаллизаторе  $\xi=f(t)$ . Результаты расчета кинетики затвердевания отливки приведены на рис. 5. Кривая 1 является расчетной зависимостью толщины затвердевшей корки во времени  $\xi=f(t)$ . Область 2, показанная точками и ограниченная сплошными линиями (линейная аппроксимация), представляет собой область экспериментальных значений толщины корки, полученных по методике выливания жидкого остатка [7].

Анализ результатов показал, что толщина затвердевшей корки по периметру во всех зонах кристаллизатора одинакова и изменяется только по высоте отливки. Расчетная минимально допустимая толщина затвердевшей корки на выходе из кристаллизатора составила  $\xi_{\text{расч}}=6,5 \cdot 10^{-3}$  м, а экспериментальная  $\xi_{\text{эксп}}=(7,5-10,0) \cdot 10^{-3}$  м (об-

ласть 2). Некоторое завышение  $\xi_{\text{эксп}}$ , как и в случае литья с открытым уровнем, является следствием несовершенства методики выливания жидкого остатка.

Такой же уровень значений и характер изменения толщины корки при литье с закрытым уровнем получен в результате расчета и экспериментального исследования кинетики затвердевания полый цилиндрической отливки из чугуна диаметром 0,1 м и толщиной 0,03 м в зависимости от температуры заливки  $T_{\text{зал}}$  (рис. 6) [8]. При температуре заливки  $T_{\text{зал}}=1350$  °С толщина корки на выходе из кристаллизатора составила  $\xi_{\text{эксп}}=7,3 \cdot 10^{-3}$  м. С уменьшением температуры до 1280 °С толщина корки возросла до  $\xi_{\text{эксп}}=10 \cdot 10^{-3}$  м, что объясняется меньшим количеством теплоты перегрева, вносимым жидким чугуном.

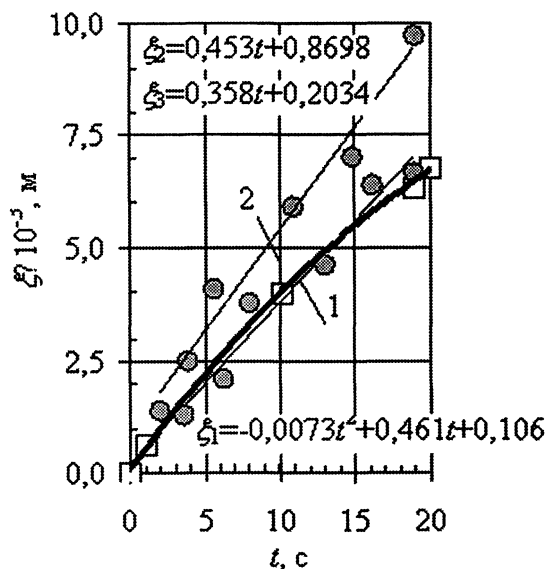


Рис. 5. Зависимость толщины корки от времени формирования сплошной отливки: 1 – расчетная; 2 – выливание жидкого остатка

Следует отметить, что увеличение температуры заливки приводит к значительному снижению скорости затвердевания и соответственно толщины корки отливки, что вызывает необходимость уменьшения скорости литья.

### Литература

1. Прогрессивная технология производства тонкостенных заготовок из чугуна / Е.Б. Демченко, А.Н. Крутилин, И.К. Филанович // Прогрессивные технологии производства литых заготовок: Тез. докл. Челябинск, 1988.
2. Способ непрерывного литья полых мерных заготовок: А.с. 1007276 СССР: МКИ\* В22D 11/04.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.

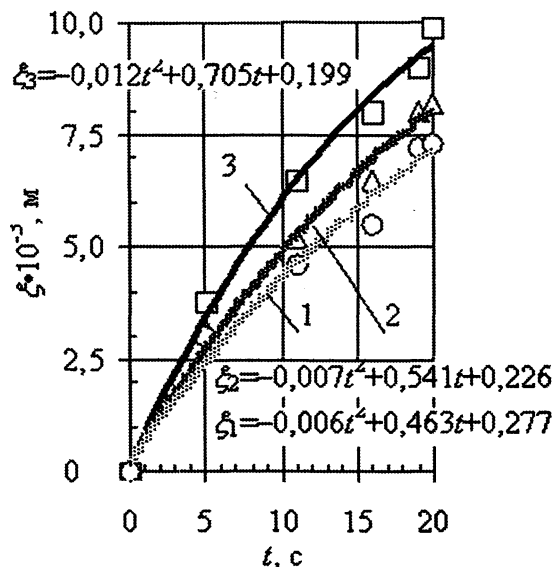


Рис. 6. Зависимость толщины корки от времени формирования полый отливки: 1 –  $T_{\text{зал}}=1350$  °С; 2 – 1320; 3 – 1280 °С

4. Казанцев Е.И. Промышленные печи. М.: Металлургия, 1975.
5. Соседов В.П. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. М.: Металлургия, 1975.
6. Расчет процесса затвердевания полый цилиндрической отливки при вертикальном непрерывном литье / Е.Б. Демченко, В.И. Тутов, В.А.Гринберг // Металлургия. Мн.: Выш. шк., 2004. Вып. 28. С. 86–93.
7. Исследование, разработка и внедрение в производство новой технологии горизонтального и вертикального непрерывного литья чугунных заготовок / В.А. Гринберг, Е.Б. Демченко, А.Н. Крутилин и др. Мн., 1985.
8. Исследование, разработка и внедрение процесса получения сплошных и полых цилиндрических заготовок станкостроения методом вертикального полунепрерывного литья / Г.И. Столярова, И.В. Земсков, Е.Б. Демченко и др. Мн., 1988.