



The worked out mathematical model confirms the presence of non-symmetrical front edge of crystallization by cut of casting and allows to estimate qualitatively the dynamics of the shell growth in crystallizer in course of time.

Е. Б. ДЕМЧЕНКО, БИТУ

УДК 621.74.047

КИНЕТИКА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВКИ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Известно, что при горизонтальном непрерывном литье в процессе формирования корки отливки в верхней зоне кристаллизатора образуется более тонкая корка, чем в нижней зоне [1—3]. Такое различие обусловлено несколькими факторами, определяющими дальнейший ход процесса затвердевания отливки. Прежде всего это усадка отливки, протекающая при ее формировании и последующем охлажденииTM. В результате усадки уменьшается размер отливки, за счет сил тяжести она прижимается к нижней зоне кристаллизатора, образуя в верхней зоне значительный по величине газовый зазор. Теплоотвод в верхней зоне ухудшается, корка перегревается и ее рост замедляется. Другой, не менее значительный фактор — это термоконвективные потоки горячего расплава, размывающие верхние участки корки и снижающие скорость затвердевания [4, 5]. Термоконвективные потоки обуславливают неравномерное распределение теплоты перегрева в полости кристаллизатора. В результате фронт кристаллизации смещается вверх и становится несимметричен относительно оси вытяжки отливки, верхние участки затвердевшей корки на 5,0–20% тоньше нижних, кроме того, имеет место запаздывание затвердевания в верхней зоне кристаллизатора (рис. 1) [2]. Все это является причинами нарушения стабильности литья и возникновения прорывов металла на выходе из кристаллизатора.

Если влияние термоконвективных потоков можно снизить, используя разделительные устройства [4], то уменьшить влияние усадки отливки на несимметричность фронта кристаллизации практически нереально. В таких случаях необходимо учитывать неравномерность фронта затвердевания в математических моделях при расчетах кинетики кристаллизации отливки и выборе оптимальных параметров литья.

Покажем это на примере расчета процесса затвердевания сплошной цилиндрической отливки радиусом R в комбинированном кристаллизаторе длиной $l_{\text{кр}}$ стальной втулкой и рабочим графитовым вкладышем.

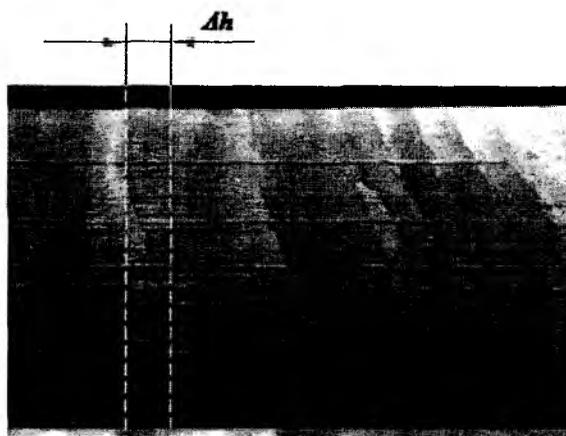


Рис. 1. Запаздывание затвердевания ДА в верхней зоне кристаллизатора сплошной цилиндрической отливки диаметром 0,08 м, чугун СЧ20

Составим для участка длиной D_1 (рис. 2), ограниченного сечениями i и $i+1$, уравнение теплового баланса системы «жидкий расплав—твердая корка—кристаллизатор»:

$$\dot{Y}_{ж} + Q_{i,m} = \dot{Y}_{i+1,ж} + \dot{Y}_{i+1,г} + \dot{Y}_{охл} + \dot{Y}_{пер} \cdot (1)$$

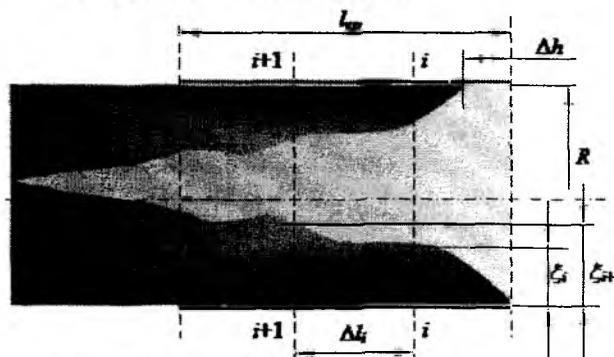


Рис. 2. Схема к расчету кинетики кристаллизации сплошной цилиндрической отливки при горизонтальном литье

Раскроем значения каждого слагаемого кроме отведенной теплоты перегрева $Q_{i,пер}$, неравномерность распределения которой учтем отдельно.

Количество тепла $Q_{i,ж}$, внесенное жидким расплавом через сечение $г$, запишем как:

где $I_{пер} = r_{пер} m_i (1 - \sin \frac{\varphi}{2})^2$ – теплота перегрева, отводимая пропорционально удельному тепловому потоку по периметру кристаллизатора и объему затвердевшего расплава;

$$m_i = \frac{q_{i,ср} \Delta l_i}{q_{ср} l} \quad \text{– коэффициент}$$

пропорциональности, учитывающий долю отведенной теплоты перегрева для i -й зоны кристаллизатора; $q_{ср}$ – средний удельный тепловой поток в кристаллизаторе. Расчет кинетики затвердевания отливки по уравнению (4) необходимо проводить методом последовательных приближений.

Адекватность математической модели эксперименту проверяли путем сравнения расчетов и результатов исследования процесса формирования сплошной цилиндрической отливки из чугуна методом термического анализа и выливания жидкого остатка. Отливку диаметром 0,10 м получали в комбинированном кристаллизаторе с графитовым вкладышем толщиной $11,3-8,2 \cdot 10^{-3}$ м и стальной втулкой $5,2 \cdot 10^{-3}-8,3 \cdot 10^{-3}$ м. Длина охлаждаемой части кристаллизатора – 0,20 м, неохлаждаемой – 0,14 м. Технологические параметры: скорость литья $w_{ср} = 0,3-60^{-1}$ м/с, температура чугуна в металлоприемнике $T = 1230-1270$ °С, время формирования отливки в кристаллизаторе $t = 40$ с.

Схема установки термопар и температурный режим $T=f(t)$ комбинированного кристаллизатора показаны на рис. 4, 5.

По мгновенному распределению температуры по толщине стальной втулки $T=f(X)$ (рис. 6) определяли удельные тепловые потоки, отводимые с поверхности отливки к охлаждающей среде по толщине стальной втулки в различных зонах кристаллизатора $q=f(X)$ (рис. 7, а), а также

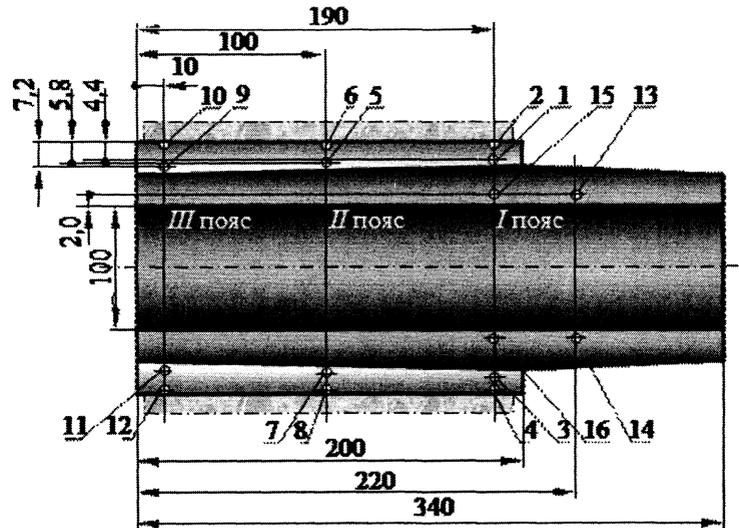


Рис. 4. Схема установки термопар: 1–15 – номера термопар

полный удельный тепловой поток в кристаллизаторе во времени $q=f(t)$ (рис. 7, б, аппроксимация по методу наименьших квадратов).

Анализ зависимостей показал, что наблюдается существенное различие в значениях теплового потока в верхней и нижней областях кристаллизатора. В условиях плотного контакта корки отливки и нижней поверхности графитового вкладыша в нижней области кристаллизатора (I пояс термопар) тепловой поток имел максимальное значение $q = 2,34$ МВт/м². В то же время в верхней области тепловой поток значительно ниже $q = 1,42$ МВт/м², что свидетельствует о наличии газового зазора на границе «корка–графитовый вкладыш» при усадке отливки.

Аналогичный характер изменения удельного теплового потока наблюдался в зоне периодического контакта корки и кристаллизатора (II и III пояса термопар), но при более низких значениях теплового потока вследствие дальнейшей усадки отливки и увеличения зазора. По мере движения

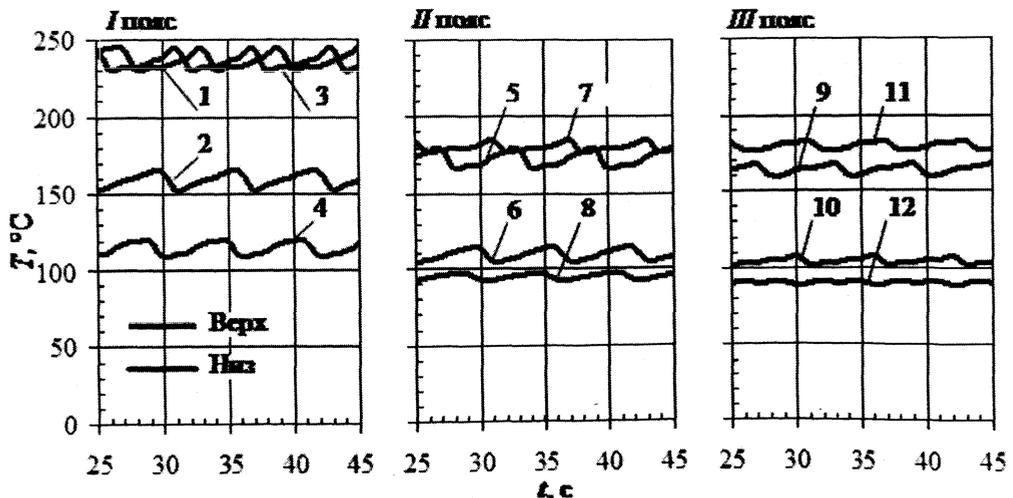


Рис. 5. Температурный режим стальной втулки комбинированного кристаллизатора: 1–12 – номера термопар

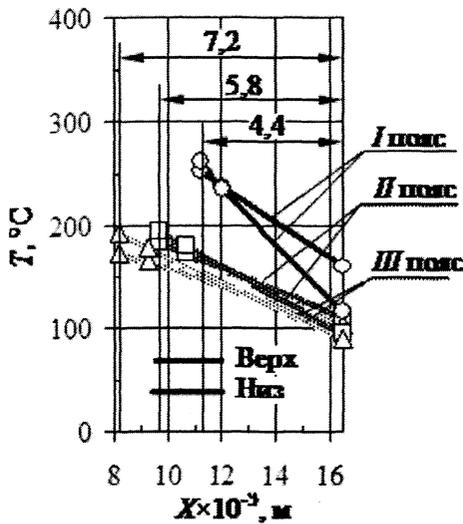


Рис. 6. Температурный режим стальной втулки комбинированного кристаллизатора

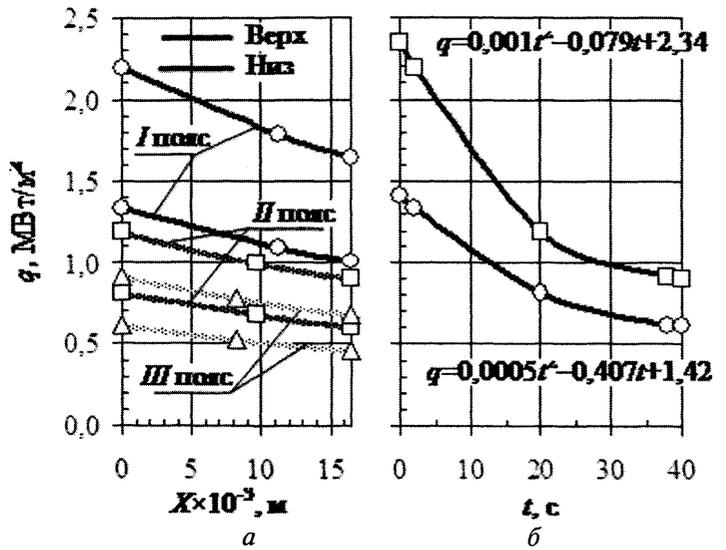


Рис. 7. Значения удельного теплового потока в верхней и нижней зонах кристаллизатора: а – по толщине комбинированной стенки в различных поясах; б – в зависимости от времени фиксирования отливки

отливки в нижней области кристаллизатора тепловой поток резко снижался до $q=1,19$ МВт/м² и на выходе из кристаллизатора составлял $q=0,90$ МВт/м². В верхней области расчетные значения удельного теплового потока составляли соответственно 0,81 и 0,61 МВт/м².

Используя математическую модель, по значениям удельного теплового потока рассчитали зависимости толщины затвердевшей корки отливки от времени ее формирования для верхней и нижней областей кристаллизатора $\xi=f(t)$ при $\varphi=0-\pi$. Вычисления проводили методом последовательных приближений с помощью алгоритма и программы расчета, написанной на языке программирования Pascal. Термофизические коэффициенты выбраны из работы [6]: $c = 753,6$ Дж/(кг·град), $c' = 837,4$ Дж/(кг·град), $\lambda = 35$ Вт/(м·град), $r = 215$ кДж/кг, $T_{\text{сол}} = 1140^\circ\text{C}$, $T_{\text{лик}} = 1210^\circ\text{C}$, $r_{\text{пер}} = 92,1$ кДж/кг, $r_{\text{эф}} = 270,7$ кДж/кг. Временные интервалы $i=4$: первый – 0–2 с, второй – 2–18, третий – 18–38, четвертый – 38–40 с.

Результаты расчета кинетики затвердевания отливки в верхней и нижней областях комбинированного кристаллизатора показаны на рис. 8. Кривая 1 является расчетной зависимостью $\xi=f(t)$ толщины корки в верхней области кристаллизатора, кривая 2 – в нижней (полиномиальная аппроксимация). Области 3, показанные точками, представляют собой толщины корки в верхней и нижней областях кристаллизатора при различных температурах расплава в металлоприемнике, полученных экспериментально по методике выливания жидкого остатка [7]. Темплеты отливки после выливания приведены на рис. 9.

Анализ показал достаточно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений толщин корки в верхней области кристаллизатора. Расчетная толщина корки на выходе из кристал-

лизатора здесь составила $\xi_{\text{расч}}=9,0\cdot 10^{-3}$ м (кривая 1, рис. 8), эксперименты по выливанию показали значения $\xi_{\text{эксп}}=9,3-12,2\cdot 10^{-3}$ м (область 3, верх, температура расплава $T=1230-1270^\circ\text{C}$). Расхождение в значениях толщин корки незначительно, экспериментальная толщина корки несколько выше, что и должно быть, учитывая условия выливания. Расчетная динамика роста корки отливки во времени соответствует экспериментальной.

В нижней области, на выходе из кристаллизатора, расчетная толщина корки составила $\xi_{\text{расч}}=20,2\cdot 10^{-3}$ м ($t=40$ с), а по результатам экспериментов – $\xi_{\text{эксп}}=28,0\cdot 10^{-3}$ м ($t=36$ с) (рис. 9, з). Здесь расхождение в результатах достаточно большое, порядка $10,0\cdot 10^{-3}$ м. Однако, учитывая значительную погрешность при определении толщины корки в нижней области кристаллизатора

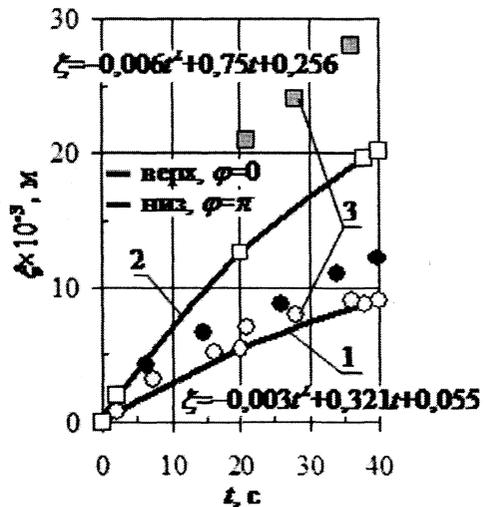


Рис. 8. Кинетика затвердевания корки отливки в кристаллизаторе: 1 – верхняя область; 2 – нижняя область; 3 – выливание (верх, низ) при $T=1230-1270^\circ\text{C}$

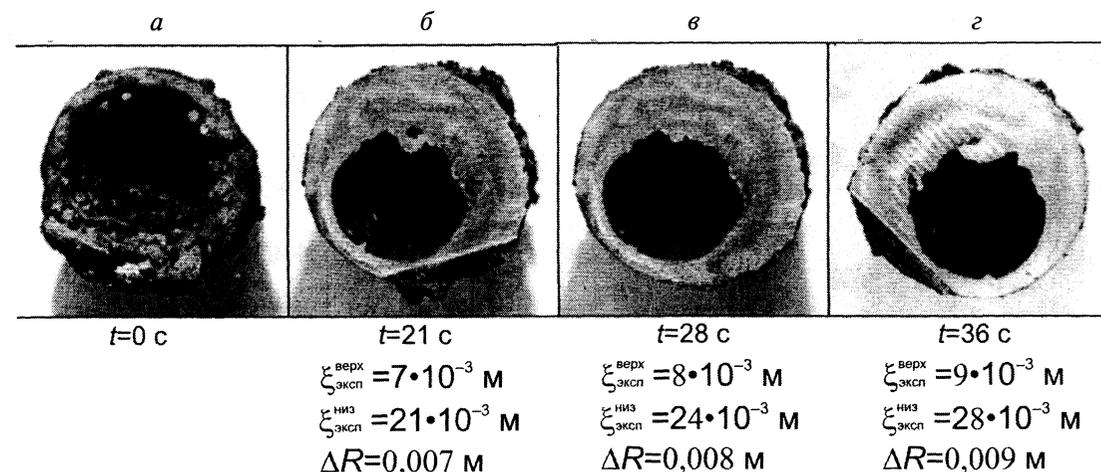


Рис. 9. Толщина корки в верхней $\xi_{\text{эксп}}^{\text{верх}}$ и нижней $\xi_{\text{эксп}}^{\text{низ}}$ частях, а также величина смещения теплового центра горизонтальной отливки после вымывания жидкого остатка в зависимости от времени формирования t в кристаллизаторе

методом выливания, можно считать расчетные значения удовлетворительными, тем более, что определение толщины корки в нижней области кристаллизатора не имеет существенного значения с точки зрения влияния на стабильность процесса литья.

Таким образом, разработанная математическая модель подтверждает наличие несимметричности фронта кристаллизации по сечению отливки и позволяет качественно оценить динамику роста корки отливки в кристаллизаторе во времени.

Основной вывод, который можно сделать из полученных результатов — это удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных значений толщин корки в верхней области кристаллизатора, что позволяет в дальнейшем использовать разработанный математический аппарат для расчетов кинетики затвердевания заготовок более сложных профилей и определения тепловых и технологических параметров при проектировании технологического процесса и оборудования горизонтального непрерывного литья.

Следует отметить соответствие полученных результатов результатам экспериментальных исследований других авторов [8].

Литература

1. Баранов О.А., Ветров Б.Г., Поль В.Б. и др. Непрерывное литье чугуна. М.: Metallurgia, 1968.
2. Шатагин О.А., Сладкошteeв В.Т. и др. Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов. М.: Metallurgia, 1974.
3. Тепловые режимы затвердевания стальных цилиндрических слитков при горизонтальном непрерывном литье / В.В. Соболев, П.М. Трефилов // Промышленная теплотехника. 1988. Т.10. №2. С. 75–78.
4. Влияние термоконвекции на стабильность процесса горизонтального непрерывного литья / Е.Б. Демченко и др. // Литейное производство. 1987. №1. С. 20–21.
5. Демченко Е.Б., Столярова Г.И., Крутилин А.Н. Аналитический учет влияния конвекции на кинетику затвердевания непрерывнолитой заготовки // Metallurgia. Мн.: Выш. шк., 1990. Вып. 24. С. 78–81.
6. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливок. М.: Машиностроение, 1976.
7. Исследование процесса непрерывного горизонтального литья чугуна и внедрение в производство мероприятий по улучшению технологии литья и качества заготовок / В.А. Гринберг, И.В. Земсков, Е.Б. Демченко и др. Мн., 1979.
8. Исследование тепловых условий затвердевания чугунной заготовки в кристаллизаторе при непрерывном горизонтальном литье / В.И. Самсонов, В.С. Ан // Новые конструкционные материалы и методика обеспечения эксплуатационных характеристик деталей станков. М., 1984. С. 70–84.