



УДК 621.746

Поступила 12.07.2013

А. Н. КРУТИЛИН, П. Е. ЛУЩИК, БНТУ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНА

Рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования процесса получения чугунных заготовок при вертикальном полунепрерывном литье

Theoretical and experimental studies of the process of obtaining iron billets with vertical semicontinuous casting were considered.

Стабильность процесса литья при вертикальном непрерывном литье заготовок из чугуна в значительной степени зависит от интенсивности теплообмена между отливкой и кристаллизатором. При формировании полых отливок в теплообмене участвует и внутренний формообразующий элемент (дорн, разрушаемый стержень), который вносит некоторые коррективы в кинетику затвердевания отливки. Формирование начальной корки со стороны кристаллизатора начинается на мениске жидкого металла, в процессе движения корка уходит вниз вдоль стенки кристаллизатора и ее дальнейшее формирование происходит под действием сил поверхностного натяжения, металлостатического напора, трения о стенки кристаллизатора. Снижение интенсивности охлаждения отливки на выходе из кристаллизатора и наличие незатвердевшего металла в отливке приводят к повышению температуры поверхности затвердевшей корки. Для осуществления стабильного процесса литья необходимо обеспечить получение на выходе из кристаллизатора достаточно прочной корки, способной противостоять суммарным напряжениям, возникающим в наиболее опасном сечении, в зоне наибольшего разогрева корки.

Теоретический анализ кинетики затвердевания, проведенный в работах [1, 2], основан на решении уравнения теплового баланса системы жидкий металл – затвердевшая отливка – охлаждающая среда:

$$dQ_{ж} + dQ_{ТВ} = -\alpha(T_{п} - T_{с})FdT, \quad (1)$$

где $dQ_{ж}$, $dQ_{ТВ}$ – соответственно изменение теплоемкости жидкого металла и затвердевающей корки; α – коэффициент теплоотдачи от поверхности отливки в окружающую среду; $T_{п}$, $T_{с}$ – соответ-

ственно температура поверхности отливки и окружающей среды; F – площадь поверхности отливки.

Для решения уравнения (1) использовали упрощения математической модели процесса. Количество тепла, переданное теплопроводностью вдоль оси заготовки, пренебрегаем. Теплофизические коэффициенты принимаем постоянными, средними в рассматриваемом интервале температур. Используя метод эквивалентной отливки [3], решаем задачу затвердевания отливки при постоянной температуре, принимая для чугуна температуру кристаллизации, равной температуре солидуса. Закон распределения температуры в затвердевшей корке задаем в виде параболы n -го порядка.

Решая уравнение (1) для полый цилиндрической отливки, получаем выражение:

$$t - t_0 = \frac{R^2}{a} \left\{ -\frac{2}{5} \frac{r_{пер}}{nc\vartheta_{кр}} \frac{1}{R} \frac{\xi^5 - \xi_0^5}{\left(2 - \frac{\xi_{кр}}{R}\right) R^5} + \frac{1}{2} \frac{r_{пер}}{c\vartheta_{кр}} \left(\frac{3}{n} - \frac{\lambda}{\alpha R} \right) \frac{1}{R} \frac{\xi^4 - \xi_0^4}{\left(2 - \frac{\xi_{кр}}{R}\right) R^4} - \frac{1}{3} \left[\frac{r_{эф} + 2r_{пер}}{c\vartheta_{кр}} + \frac{2}{(n+1)(n+2)} - \frac{2r_{пер}}{c\vartheta_{кр}} \frac{\xi_{кр}}{R} \left(\frac{3n\lambda}{\alpha R} - 2 \right) \frac{\xi^3 - \xi_0^3}{R^3} \right] + \frac{1}{2n} \left[\frac{r_{эф} + 2r_{пер}}{c\vartheta_{кр}} + \frac{1}{n+1} - \frac{n\lambda}{\alpha R} \frac{r_{эф} + 2r_{пер}}{c\vartheta_{кр}} \right] \right\} \quad (2)$$

$$\frac{4r_{\text{пер}}n\lambda}{\alpha R \frac{\xi_{\text{к}}}{R} \left(2 - \frac{\xi_{\text{к}}}{R}\right) c \vartheta_{\text{кр}}} - \frac{\lambda}{\alpha R(n+1)(n+2)} \left] \frac{\xi^2 - \xi_0^2}{R^2} + \frac{\lambda}{\alpha R} \left[\frac{r_{\text{эф}} + 2r_{\text{пер}}}{c \vartheta_{\text{кр}}} + \frac{1}{n+1} + \frac{n\lambda}{\alpha R(n+1)(n+2)} \right] \frac{\xi - \xi_0}{R} - \frac{n}{n+1} \left(\frac{\lambda}{\alpha R} \right)^2 \left(1 + \frac{n}{n+2} \frac{\lambda}{\alpha R} \right) \ln \frac{\xi + \frac{n\lambda}{\alpha}}{\xi_0 + \frac{n\lambda}{\alpha}} \Bigg\}.$$

Эффективную удельную теплоту кристаллизации определяем с учетом аккумулированной теплоты, выделяющейся в интервале температур кристаллизации:

$$r_{\text{эф}} = r + \frac{c' + c}{2} (T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}}), \quad (3)$$

где r – истинная удельная теплота кристаллизации; c' – удельная теплоемкость жидкого металла.

Удельную теплоту перегрева рассчитываем из выражения:

$$r_{\text{пер}} = c'(T_0 - T_{\text{кр}}), \quad (4)$$

где T_0 – температура металла заливаемого в кристаллизатор.

Аналитическая зависимость (2), которая описывает кинетику затвердевания корки со стороны кристаллизатора, получена при условии постоянства во времени коэффициента теплоотдачи от поверхности заготовки в окружающую среду. Однако в реальных условиях непрерывного литья коэффициент теплоотдачи является функцией времени. Поэтому для получения в явном виде зависимости $\xi = f(t)$ необходимо, используя зависимость $\alpha = \varphi(t)$, применять метод последовательных приближений [4]. При наличии данных о коэффициенте теплоотдачи, используя зависимость (2) и подстановку $t = H/W$ (H – высота кристаллизатора; W – средняя

скорость литья), можно определить кинетику затвердевания отливки в зависимости от технологических параметров литья, при заданной скорости литья и оптимальных технологических параметрах процесса – необходимую высоту кристаллизатора и т. д.

Используя условие равенства удельных тепловых потоков через затвердевшую корку и от поверхности отливки к охлаждающей среде:

$$\frac{\lambda}{\xi} (T_{\text{кр}} - T_{\text{п}}) = \alpha (T_{\text{п}} - T_{\text{с}}), \quad (5)$$

можно рассчитать температуру поверхности отливки в каждый конкретный момент времени, которому соответствует толщина затвердевшей корки ξ :

$$T_{\text{п}} = T_{\text{кр}} - \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{с}}}{1 + \frac{\lambda}{\alpha \xi}}. \quad (6)$$

В результате многочисленных экспериментов получены значения удельного теплового потока, отводимого от поверхности заготовки при литье в стальной кристаллизатор полых цилиндрических заготовок диаметром от 80 до 250 мм, со скоростями 0,3–1,8 м/мин и температурами заливки 1250–1350 °С (рис. 1).

Исходные теплофизические данные для расчета взяты из работ [3,5]: $a = 0,68 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $c = 753,6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°С})$; $c' = 837,4 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°С})$; $\lambda = 37,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$; $r = 215 \text{ кДж}/\text{кг}$; $T_{\text{сол}} = 1140 \text{ °С}$; $T_{\text{лик}} = 1210 \text{ °С}$; $\eta_{\text{кр}} = 1140 - 20 = 1120 \text{ °С}$; $r_{\text{эф}} = 270,7 \text{ кДж}/\text{кг}$ (рассчитано по формуле (3)). Распределение температур в стенке цилиндрической заготовки принято линейным ($n = 1$).

Расчет произведен для заготовок пяти диаметров ($R = 40, 50, 75, 100, 125 \text{ мм}$) и пяти толщин стенок ($\xi_{\text{к}} = 15, 20, 25, 30, 35 \text{ мм}$) при $R = 40$ и 50 мм и $15, 25, 35, 45, 55 \text{ мм}$ при $R = 75$ и 125 мм для трех температур заливки ($T_0 = 1250, 1300, 1350 \text{ °С}$).

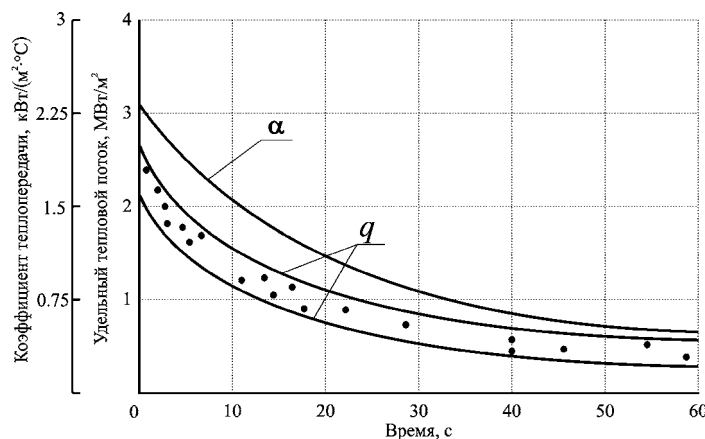


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопередачи α и удельного теплового потока q от времени формирования отливки в кристаллизаторе

Удельная теплота перегрева, рассчитанная по формуле (4), равна 33,5, 75,4 и 117,2 кДж/кг соответственно.

Расчет кинетики затвердевания выполнен поэтапно в интервале 0–60 с. Полное время затвердевания разбито на 11 интервалов, величина интервала увеличивается. В табл. 1 приведены значения коэффициентов теплопередачи.

Таблица 1. Значения коэффициентов теплопередачи

t, c	2	4	6	8	10
$\alpha, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	1880	1660	1510	1380	1270
$\acute{\alpha}, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	2040	1770	1585	1445	1325
t, c	20	30	40	50	60
$\alpha, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	860	710	650	600	560
$\acute{\alpha}, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	930	780	680	625	580

Примечание. α – коэффициент теплопередачи в данный момент времени t (используется при расчете температуры поверхности по формуле (6)); $\acute{\alpha}$ – средний в данном временном интервале коэффициент теплопередачи (используется для расчета кинетики затвердевания по формуле (2)).

Результаты расчета кинетики затвердевания и температуры поверхности в кристаллизаторе для полой цилиндрической заготовки диаметром 100 мм, толщиной 25 мм при трех различных температурах заливки 1250, 1300, 1350 °С представлены на рис. 2.

Анализ кинетики затвердевания показывает, что при температуре заливки 1300 °С средняя скорость затвердевания за 60 с пребывания в кристаллизаторе составляет 0,29 мм/с. В начальный момент времени, за первые 2 с, скорость затвердевания составляет 0,7 мм/с. С повышением температуры заливки скорость затвердевания падает. Рост корки сопровождается снижением температуры поверхности. В начальный период затвердевания,

за первые 6 с, происходит резкое снижение температуры поверхности на 160 °С. В дальнейшем скорость изменения температуры поверхности уменьшается и на выходе из кристаллизатора составляет 1,0–1,5 °С/с.

По истечении 60 с формирования температура поверхности снижается до 890–930 °С. Большие значения температуры поверхности соответствуют более высокой температуре заливки. Таким образом, уменьшение температуры заливки приводит к одновременному уменьшению толщины затвердевшей корки и повышению ее температуры, что негативно сказывается на стабильности процесса литья.

Несколько слов о методике проведения экспериментальных исследований температурного поля отливки. Вольфрам-рениевые термопары ВР5-20 с диаметром электродов 0,2 мм сваривали встык и помещали в кварцевые капилляры. Для более точного расположения термопар по сечению отливки использовали технологический процесс получения мерных заготовок с использованием разделительных фланцев, между которыми и устанавливали параллельно поверхности кристаллизатора термопары. Безусловно, данная методика измерения оказывает влияние на конвективное движение металла по сравнению с технологическим процессом получения полых заготовок без разделения на мерные части.

Результаты экспериментальных исследований температурного поля непрерывнолитой заготовки диаметром 100 мм, толщиной стенки 25 мм, при скорости литья 0,9 м/мин в кристаллизатор высотой 300 мм при температуре заливки металла 1300 °С представлены на рис. 3. Кривые 1–3 показывают изменение температуры во времени на расстоянии 7,5; 4,0 и 1,5 мм от поверхности кристаллизатора.

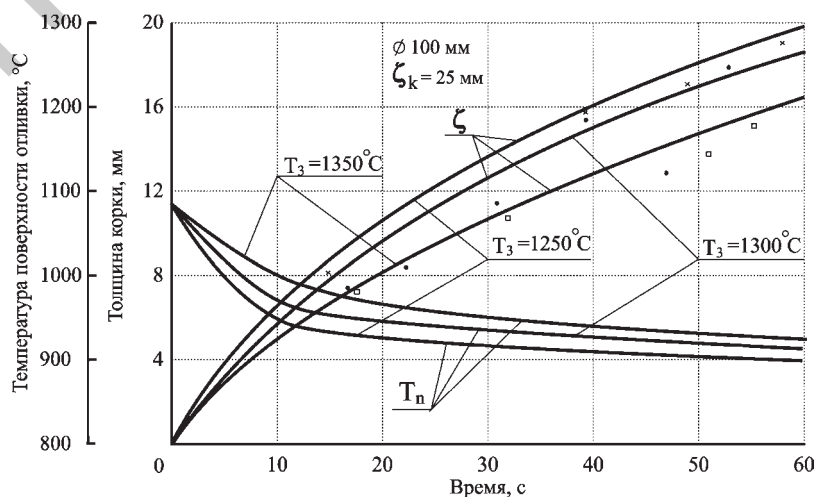


Рис. 2. Кинетика затвердевания и температура поверхности полой заготовки при различных температурах заливки: x, o, □ – экспериментальные данные по толщине корки при температурах 1250, 1300, 1350 °С соответственно

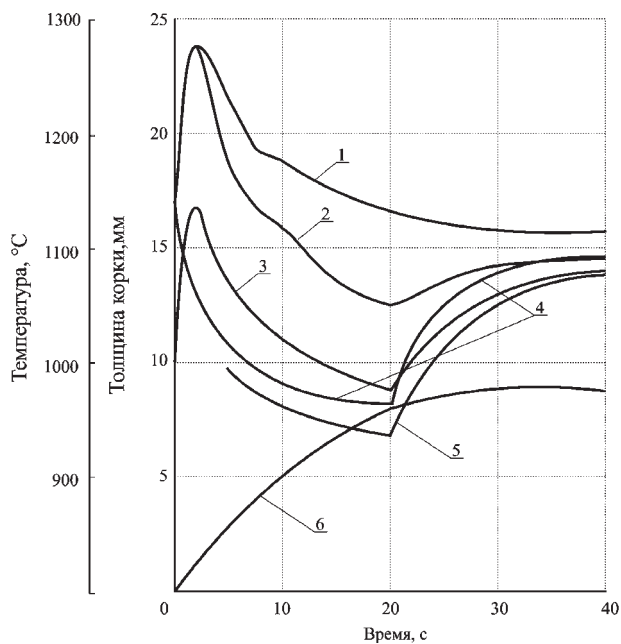


Рис. 3. Температурное поле непрерывнолитой заготовки: 1–3 – изменение температуры металла на расстоянии 7,5, 4,0 и 1,5 мм от поверхности кристаллизатора; 4 – расчетная кривая температуры поверхности отливки; 5 – экспериментальная кривая температуры поверхности отливки; 6 – расчетная кривая кинетики затвердевания отливки

Точки перегиба на кривых 1 и 2 соответствуют началу кристаллизации в этих сечениях. Сопоставление точек перегиба с экспериментальной кинетической кривой затвердевания (кривая 6) говорит о хорошем соответствии экспериментальных данных с расчетными. Экстраполяцией значений температур на кривых 1–3 в различных сечениях получена экспериментальная кривая температуры поверхности отливки (кривая 5). Экспериментальные значения температуры поверхности несколько ниже расчетных (кривая 4), однако расхождение не превышает 10–15 °С.

На рис. 4 показана зависимость толщины затвердевшей корки от скорости литья для заготовки диаметром 100 мм, толщиной стенки 15 и 35 мм при тех же температурах заливки, что и на рис. 2. Скорость литья получена из условий формирования заготовки в кристаллизаторе высотой 300 мм. Из рисунка видно, что основное влияние на затвердевание отливки оказывает скорость литья.

Следующим по значимости фактором, влияющим на кинетику затвердевания отливки, является температура заливки. Увеличение толщины стенки заготовки делает влияние температуры заливки на кинетику затвердевания более заметным.

Экспериментальные исследования выявили несколько более значительное влияние степени перегрева чугуна на толщину затвердевшей корки, чем теоретический анализ. При выводе формулы (2), на которой основан теоретический анализ, было

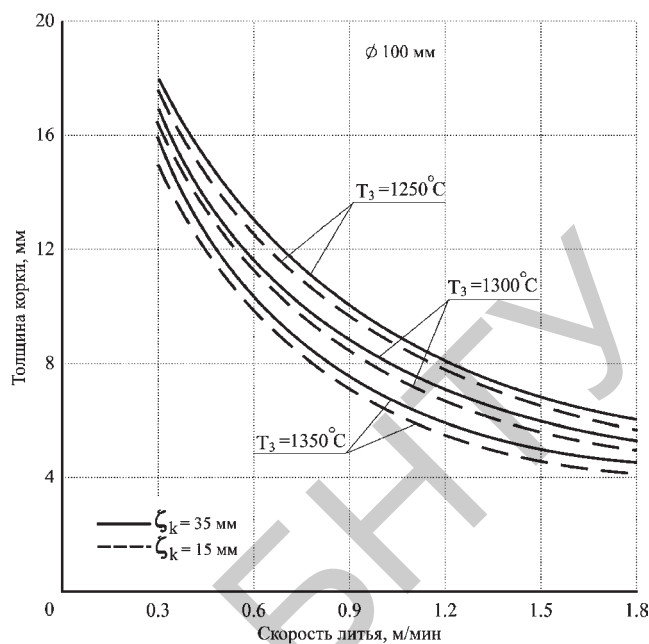


Рис. 4. Зависимость толщины затвердевшей корки от скорости литья

принято, что теплота перегрева снимается по всей длине фронта затвердевания дифференцированно, более интенсивно в начальной стадии процесса. Расчеты показывают, что при этом в кристаллизаторе снимается 75–90% всей теплоты перегрева расплава. Такая математическая модель учета теплоты перегрева гораздо ближе к реальной физической картине процесса непрерывного литья, чем модели, принятые в работах [6–8], и полностью подтверждается экспериментами при литье достаточно массивных заготовок в комбинированном кристаллизаторе, как это имеет место при горизонтальном непрерывном литье чугуна. При литье сравнительно тонкостенных заготовок в металлический кристаллизатор с более интенсивным, чем в комбинированном кристаллизаторе охлаждением, в кристаллизаторе снимается до 100% всей теплоты перегрева, что вызывает некоторое расхождение теоретических и экспериментальных данных.

Как было показано выше, математическая модель процесса предусматривает снятие теплоты перегрева со всего объема жидкого металла преимущественно в кристаллизаторе, а снятие теплоты кристаллизации и аккумулированной теплоты равномерно вдоль фронта затвердевания, т. е. пропорционально массе затвердевшего металла. Объем жидкого металла при неизменном наружном диаметре заготовки определяется толщиной ее стенки. При температуре заливки 1250 °С теплота перегрева составляет 43% теплоты кристаллизации и влияние толщины стенки на процесс затвердевания увеличивается.

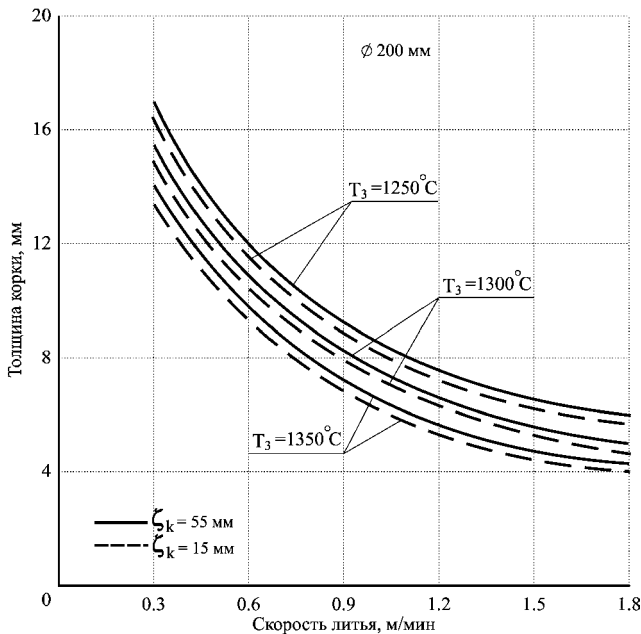


Рис. 5. Зависимость толщины затвердевшей корки от скорости литья

На рис. 5 показана зависимость толщины затвердевшей корки от скорости литья для полый заготовки диаметром 200 мм. Абсолютные значения толщины затвердевшей корки при прочих неизменных параметрах меньше, чем при литье заготовки диаметром 100 мм. Характер всех зависимостей остается неизменным, хотя количественные характеристики этих зависимостей несколько изменяются, незначительно уменьшается влияние скорости литья на процесс затвердевания и увеличивается влияние температуры заливаемого металла.

Таким образом, анализ процесса затвердевания полый цилиндрической заготовки показал, что основными факторами, определяющими толщину корки на выходе из кристаллизатора, а, следовательно, и стабильность процесса литья, являются скорость литья и температура заливаемого металла. Влияние геометрических размеров заготовки на процесс затвердевания носит второстепенный характер.

На выходе отливки из кристаллизатора происходит изменение условий охлаждения, интенсивное охлаждение в кристаллизаторе ($\alpha = 550\text{--}2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$) сменяется охлаждением в естественных условиях на воздухе ($\alpha = 100\text{--}190 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$). При неизменном термическом сопротивлении затвердевшей корки отливки уменьшается тепловой поток с поверхности отливки в окружающую среду, в результате происходит перераспределение температур по сечению отливки.

Температура поверхности отливки возрастает, увеличивается тепловой поток с поверхности от-

ливки в окружающую среду, уменьшаются градиент температур по сечению отливки и тепловой поток, подводимый к поверхности. В момент наступления равенства тепловых потоков устанавливается стационарное тепловое состояние, температура поверхности достигает максимального значения. С ростом температуры поверхности увеличивается и средняя температура затвердевшей корки, уменьшается ее прочность. Уровень действующих напряжений и прочностные характеристики затвердевшей корки определяют стабильность процесса литья. Для определения оптимальных технологических параметров литья необходимо знать значение максимальной температуры поверхности и время достижения этой температуры или расстояние от нижнего торца кристаллизатора до наиболее разогретого сечения.

Принимая в первом приближении допущение, что в процессе разогрева затвердевание не происходит, определяем максимальную температуру поверхности T_{max} из условия стационарного теплового состояния, т. е. равенства тепловых потоков при передаче тепла теплопроводностью через затвердевшую корку и с поверхности отливки в окружающую среду путем конвекции и излучения:

$$\frac{\lambda}{\xi} (T_{\text{кр}} - T_{\text{max}}) = c \left[\left(\frac{T_{\text{max}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_k (T_{\text{max}} - T_c), \quad (7)$$

где ξ – толщина корки на выходе из кристаллизатора; c – коэффициент излучения поверхности отливки; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Для определения времени разогрева воспользуемся методами теплопроводности [10]. Рассматриваем вышедшую из кристаллизатора корку как неограниченную пластину толщиной ξ . На внутренней поверхности пластины имеют место граничные условия первого рода (задана постоянная температура поверхности):

$$T_{x=\xi} = T_{\text{кр}}, \quad (8)$$

на наружной поверхности – граничные условия третьего рода (задана постоянная температура среды):

$$\lambda \frac{\partial}{\partial x} \Big|_0 = \alpha (T_0 - T_c) \quad (9)$$

Распределение температур по толщине корки – линейное, температура произвольной точки в начальный момент времени описывается уравнением:

$$T|_{t=0} = T_{\text{п.к}} + \Delta T \frac{x}{\lambda}, \quad (10)$$

где $\Delta T = T_{кр} - T_{п,к}$; $T_{п,к}$ – температура поверхности отливки на выходе из кристаллизатора.

Решение задачи в критериальном виде для параметра температуры будет [11]:

$$Q = \frac{Bi(1-\eta)}{Bi+1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin[\vartheta_n(1-\eta)] \exp(-\vartheta_n^2 Fo), \quad (11)$$

где ϑ_n – корень характеристического уравнения:

$$\operatorname{tg} \vartheta_n = -\frac{1}{Bi} \vartheta_n; \quad (12)$$

$$A_n = \frac{2Bi}{\sin \vartheta_n (\vartheta_n^2 + Bi^2 + Bi)}; \quad (13)$$

Bi – критерий Био; Fo – критерий Фурье; η – безразмерная координата.

Используя принцип сложной суперпозиции, расчетную формулу для определения температуры в произвольной точке тела в произвольный момент времени можно записать:

$$T = T_{п,к} + \Delta T \frac{x}{\xi} + Q \left[\frac{\Delta T}{Bi} - (T_{п,к} - T_c) \right]. \quad (14)$$

Из выражения (14) определим параметр температуры:

$$Q = \frac{T - T_{п,к}}{\frac{\Delta T}{Bi} - (T_{п,к} - T_c)}. \quad (15)$$

Рассматривая температуру поверхности ($\eta=0$), учитывая, что при регулярном тепловом режиме 1-го рода для тел классической формы (пластина, цилиндр, шар) все члены ряда в уравнении (11) становятся малыми по сравнению с первым членом и, осуществляя подстановку (15) в выражение (11), получаем окончательную расчетную формулу:

$$\frac{T_{п,к} - T_{п,к}}{\frac{\Delta T}{Bi} - (T_{п,к} - T_c)} = \frac{Bi}{Bi+1} - \frac{2Bi}{\vartheta_n + Bi^2 + Bi} \exp(-\vartheta_n^2 Fo). \quad (16)$$

Задавая $T_{п,к}$ значения T_{max} и решая это уравнение относительно Fo , получаем время разогрева и, зная среднюю скорость литья, – расстояние от нижнего торца кристаллизатора до наиболее разогретого сечения.

Как показали расчеты и экспериментальные данные, время разогрева сопоставимо со временем формирования отливки в кристаллизаторе. Поэтому допущение, что в процессе разогрева не происходит затвердевания, является слишком грубым. Для учета затвердевания в процессе разогрева было составлено и решено уравнение теплового баланса на участке разогрева:

$$Q_{акк} + Q_{окр} = Q_{кр}. \quad (17)$$

Поскольку, как было отмечено ранее, основная часть теплоты перегрева к моменту выхода отливки из кристаллизатора уже снята, можно считать, что все количество тепла, израсходованное на разогрев корки $Q_{акк}$ и потери в окружающую среду $Q_{окр}$, выделилось на фронте кристаллизации $Q_{кр}$. Величины, входящие в уравнение (17), можно определить из выражений:

$$Q_{акк} = 2\pi R \xi_{кр} l_p \rho c (T'_{ср} - T_{ср}), \quad (18)$$

$$Q_{окр} = 2\pi R l_p \alpha_{ср} (T_{max} - T_c) t_p, \quad (19)$$

$$Q_{кр} = 2\pi R l_p D \xi_{р} \rho'_{эф}, \quad (20)$$

где $T_{ср} = \frac{T_{кр} + T_{п,к}}{2}$ – средняя температура корки

на выходе из кристаллизатора; $T'_{ср} = \frac{T_{кр} + T_{max}}{2}$ –

средняя температура корки в максимально разогретом сечении; $\Delta \xi$ – толщина корки, затвердевшей за время разогрева t_p ; $\alpha_{ср}$ – средний коэффициент теплоотдачи от поверхности отливки в окружающую среду за период разогрева.

Подставив выражения (18)–(20) в уравнение (17), произведя некоторые преобразования, и решив его относительно $\Delta \xi$, получим:

$$\Delta \xi = \frac{c\rho(T'_{ср} - T_{ср}) + \alpha(T_{max} - T_{ср})t_p}{\rho'_{эф}}. \quad (21)$$

Толщина корки к моменту достижения максимальной температуры:

$$\xi' = \xi + \Delta \xi. \quad (22)$$

Повторно решив уравнение (7), предварительно заменив в нем ξ на ξ' , получим уточненное значение максимальной температуры поверхности T'_{max} и средней температуры корки $T'''_{ср}$ в этом сечении.

Следует иметь в виду, что каждое конкретное время, приведенное в табл. 1, рассматривается в дальнейших расчетах при заданной скорости литья как время пребывания отливки в кристаллизаторе высотой 300 мм, а соответствующая этому времени толщина затвердевшей корки – как толщина отливки на выходе из кристаллизатора. В табл. 2 приведены заложенные в исходные данные для расчета дискретные значения времени формирования отливки в кристаллизаторе и средние скорости литья, соответствующие этим значениям времени при литье в кристаллизатор высотой 300 мм.

Таблица 2. Время формирования отливки в кристаллизаторе и средняя скорость литья

t, c	10	15	20	30	40	50	60
$W, м/мин$	1,8	1,2	0,9	0,6	0,45	0,36	0,3

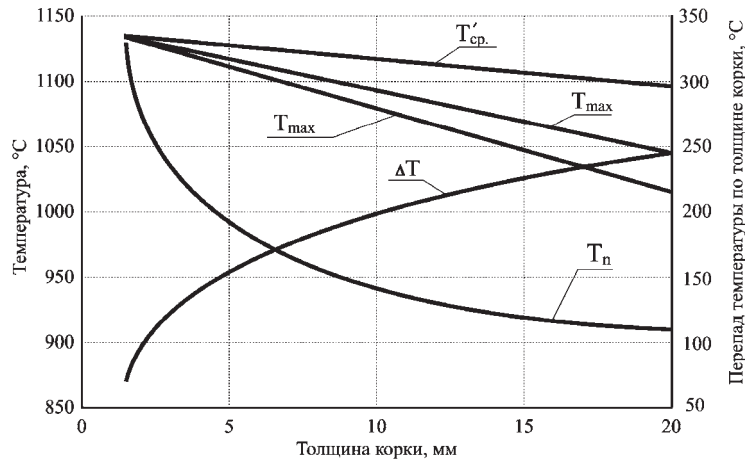


Рис. 6. Температурные параметры разогрева

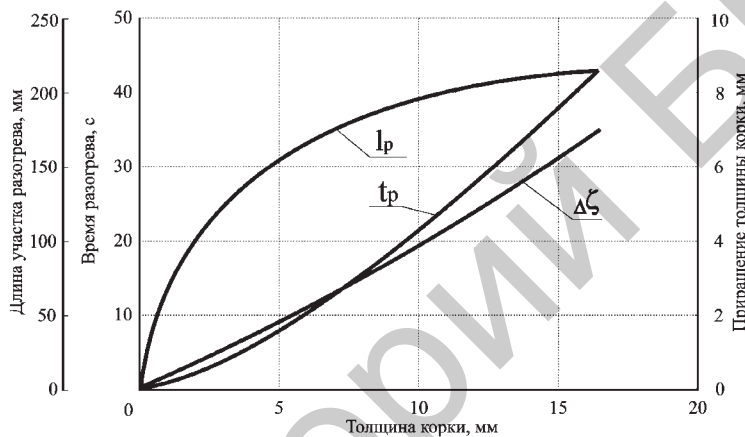


Рис. 7. Зависимость времени и длины участка разогрева от толщины корки

Параметры разогрева отливки определяются толщиной корки и температурой ее поверхности на выходе из кристаллизатора. Температура поверхности определяется толщиной затвердевшей корки в совокупности с тепловыми условиями формирования. Результаты расчета параметров разогрева приведены на рис. 6, зависимости времени и длины участка разогрева от толщины затвердевшей корки на выходе из кристаллизатора – на рис. 7.

Для оценки кинетики разогрева и проверки правильности выбранной методики расчета по формулам (15), (16) проведен расчет кинетики разогрева отливки диаметром 100 мм с толщиной корки на выходе из кристаллизатора 8,2 мм и температурой поверхности 962 °C. Расчетная кривая разогрева (кривая 4) нанесена на экспериментальное температурное поле отливки (см. рис. 3). Расчетное время разогрева поверхности заготовки составило 12,7 с, а экспериментальное – 19 с.

Расчетная максимальная температура поверхности составила 1094 °C, что на 20 °C выше экспериментальной. Расхождение расчетных и экспериментальных данных объясняется тем, что расчет по формулам (15), (16) не учитывает затвердевание, протекающее во время разогрева, а также

теплосток в вертикальном направлении за счет осевого градиента температур.

Последующая поправка на затвердевание дала расчетное значение максимальной температуры поверхности 1079 °C, что весьма близко к полученной в эксперименте. Анализ кинетики разогрева показывает, что, как при расчете, так и в эксперименте, фактический разогрев поверхности происходит за первые 10 с, а затем следует медленное асимптотическое приближение температурной кривой к максимуму.

Современный этап развития неразрывно связан с использованием компьютерных программ численного моделирования литейных процессов. На этапе разработки технологических процессов и освоения их в производственных условиях существенно сокращается время, необходимое для выполнения комплексного анализа по определению оптимальных технологических параметров литейных процессов, а также автоматизированному проектированию технологической оснастки и современного оборудования. К сожалению, математическое моделирование литейных процессов пока еще не стало средством повышения эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских

работ с целью создания новых и совершенствования существующих технологических процессов литья. Предварительный теоретический анализ сложных гидродинамических и теплофизических процессов формирования отливки позволяет существенно повысить информативность и надежность получаемых результатов, обобщить влияние многочисленных исходных технологических параметров.

Для всестороннего анализа процессов формирования отливки необходимо решить систему дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, в которые входят уравнения Навье-Стокса, Фурье-Кирхгофа и уравнение неразрывности или сплошности.

Решение задачи затвердевания и охлаждения отливки на основе уравнения нестационарной теплопроводности при соответствующих граничных условиях требует правильного учета неравномерности выделения скрытой теплоты кристаллизации в интервале температур затвердевания и теплопередачи через границу сопряжения отливки и формы. Наибольшую достоверность при изучении процессов теплообмена обеспечивает экспериментальное определение спектра тепловыделения по кривым охлаждения [9].

Если для алюминиевых сплавов некоторых видов сталей существует однозначная зависимость тепловыделения от относительного количества твердой фазы в широком диапазоне скоростей затвердевания, то для чугунов необходимо использовать модель с переменным значением скрытой теплоты кристаллизации. При неравновесной кристаллизации структура чугуна в отливке зависит от выделения стабильных и метастабильных фаз графита и цементита, удельная теплота выделения которых значительно отличается, поэтому использование в расчетах значений средней теплоты кристаллизации без учета соотношения количеств образующихся фаз вносит существенную погрешность в получаемые результаты. Кроме того, параметры кристаллизации сплава зависят от химического состава чугуна, шихтовых материалов, условий выплавки, рафинирования, модифицирования расплава и т. д. [10].

Значения теплоемкости и теплоты кристаллизации на различных этапах формирования отливки определяют термодинамическим расчетом изменения энтальпии чугуна при кристаллизации. Термодинамический анализ, проведенный на основе сопоставления энергии Гиббса при стабильной и метастабильной кристаллизации в сходственных точках эвтектического превращения, позволяет количественно определить склонность чугунов к гра-

фитизации. При этом важную роль играют кинетические факторы, оценку влияния которых проводят на основе решения сопряженной задачи теплообмена и структурообразования [11, 12].

Связь количества твердой фазы с диаграммами состояния объективно не отражает действительный характер тепловыделения.

Метод эффективной теплоемкости, в котором материалу сплава приписывают переменную теплоемкость, эффективно использовать в условиях высоких скоростей кристаллизации расплавов при отсутствии эвтектических площадок.

Учет выделения скрытой теплоты на основе использования понятия мощности внутренних источников теплоты возможен в случае небольших скоростей охлаждения для сплавов с большим интервалом кристаллизации при постоянном темпе выделения твердой фазы, а так как зависимость тепловыделения во времени неизвестна, использование этого способа нерационально.

Представляет интерес применение кусочно-непрерывных зависимостей на нескольких неравномерных интервалах. Это позволяет задавать самые разнообразные характеры тепловыделения с резкими перегибами, площадками и т. п. Конкретный вид зависимости представляют в виде спектра выделения твердой фазы, а скрытую теплоту кристаллизации и характер ее выделения определяют экспериментально на образцах простейшей конфигурации [13].

Среди систем математического моделирования литейных процессов в настоящее время наибольший интерес представляют «Полигон» и профессиональная американо-швейцарская система компьютерного 3D моделирования литейных процессов ProCAST.

В системе моделирования ProCast модуль теплового анализа (Thermal Analysis) позволяет рассчитывать выделение скрытой теплоты энтальпийным методом с учетом задаваемого спектра выделения твердой фазы.

Теоретический анализ процесса непрерывного литья в системе моделирования ProCAST осуществляется двумя различными способами: в стабильном состоянии (моделируется стационарный домен, твердая фаза переводится через домен при заданной скорости литья) и переходные расчеты в нестабильном состоянии. В последнем случае размер домена увеличивается со временем в процессе непрерывного литья. Новый алгоритм, который называется MiLE (for Mixed Lagrangian-Eulerian), создается и реализуется для развертки домена. Алгоритм предназначен для обеспечения постоянства параметров (температуры, разрывов

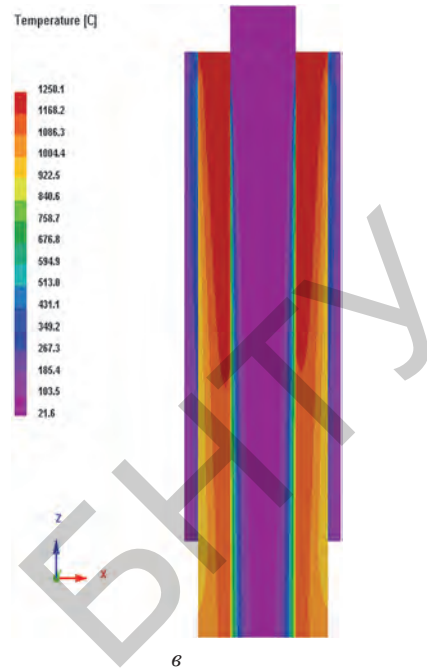
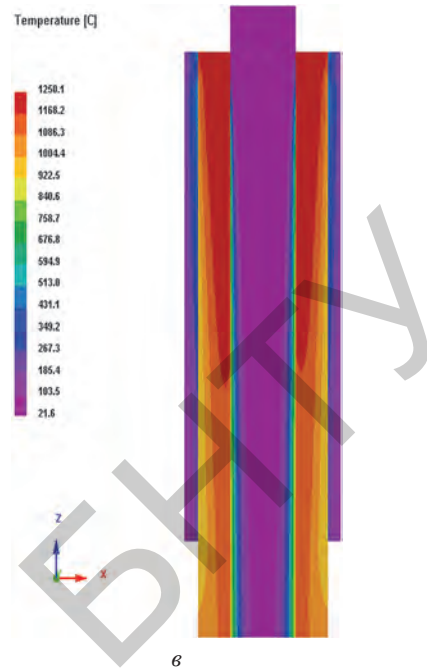
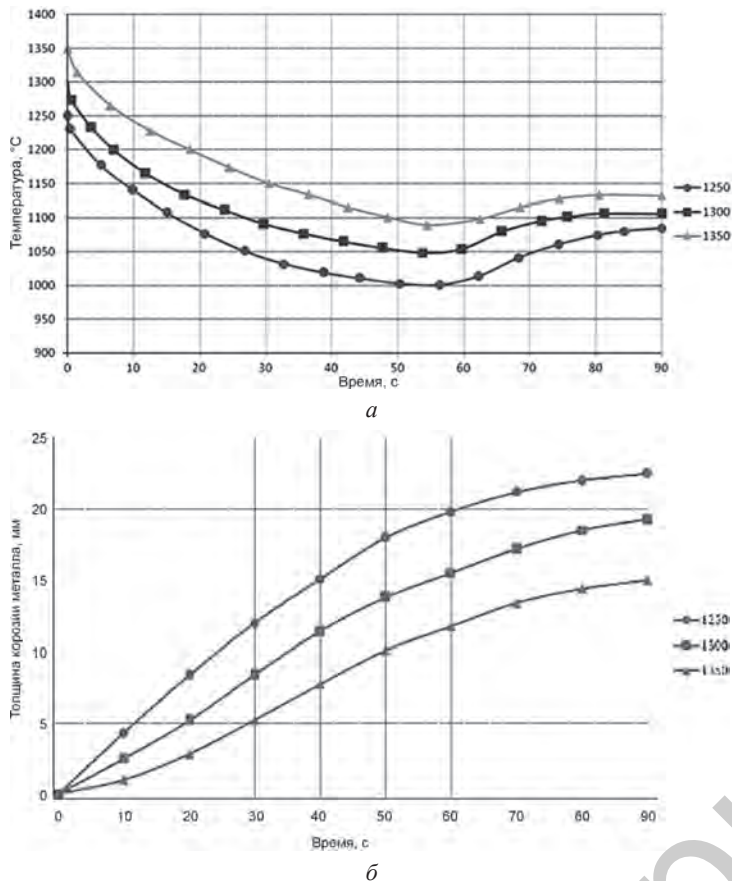


Рис. 8. Температурные параметры формирования отливки: *а* – температура поверхности отливки; *б* – кинетика кристаллизации отливки в кристаллизаторе; *в* – палитра температурного поля отливки

твердой фазы, скорости и давления гармошки). Для ввода новых слоев элементов в начале расчетов (в DataCAST) между доменами 1 и 2 создаются слои нулевой толщины, которые в течение процесса литья растягиваются.

В стабильном состоянии возможно выполнить отдельно термические расчеты либо совмещенные термические и гидродинамические расчеты. В обоих случаях при выполнении термических расчетов затвердевшая корка металла и расплав совершают движение в соответствии с заданной скоростью литья.

Алгоритм MiLE используется для модели прямого непрерывного литья, использовать алгоритм для процесса радиального непрерывного литья с изгибом заготовок или литья полос нельзя. В этом случае алгоритм позволяет совместить расчеты напряжения с тепловыми и гидродинамическими расчетами. Однако необходимо учесть ограничение – исключить попадание твердой фазы в зону гармошки (между доменами 1 и 3), т. е. граница гармошки должна находиться в жидкой фазе.

Как отмечалось ранее, охлаждение наружного периметра заготовки при непрерывном литье – это достаточно сложный процесс, на начальном этапе происходит теплообмен между отливкой и кристаллизатором, а на выходе из кристаллизатора интенсивность теплообмена резко снижается, про-

исходит охлаждение отливки на воздухе. В результате изменения интенсивности охлаждения происходит разогрев отливки на выходе из кристаллизатора. С перемещением домена можно задать переход от одних условий теплообмена к другим. После создания гармошки можно установить коэффициент теплообмена α на выходе из кристаллизатора.

Представляет интерес проведение сравнительного анализа данных по кинетике затвердевания и охлаждения отливки в процессе полунепрерывного литья чугуна в зависимости от условий формирования отливки, полученных по формуле (2) и с использованием системы моделирования ProCast.

Сопоставительный анализ проведен при идентичных условиях формирования литой заготовки и при одинаковых теплофизических характеристиках материала отливки. На рис. 8, *а* приведены результаты расчета температуры поверхности заготовки в кристаллизаторе и на выходе из него и кинетика кристаллизации корки в кристаллизаторе (рис. 8, *б*) для трех температур заливаемого металла 1250, 1300 и 1350 °C. Палитра температурных полей показана на рис. 8, *в*.

Из рисунка видно, что расчетные значения толщины корки на выходе из кристаллизатора существенно различаются. Значения толщины корки, рассчитанные по формуле (2), во всем исследован-

ном диапазоне скоростей и температур металла больше, чем полученные расчетным способом в системе моделирования ProCast. С ростом температуры заливаемого металла и с увеличением скорости литья разность значений существенно повышается. Так, например, при скорости литья 0,3/мин и температуре заливаемого металла 1250 °С разность в значениях составляет около 1%, а при скорости литья 0,9 м/мин – уже 20%. Для скорости литья 0,3/мин с увеличением температуры заливаемого металла от 1250 до 1350 °С разность в значениях толщины корки увеличивается почти на 30%, а при скорости литья 0,45 м/мин – с 5,7% для температуры 1250 °С до 41% при температуре металла 1350 °С.

Наибольший интерес с точки зрения стабильности процесса литья представляют данные о максимальной температуре поверхности отливки в зоне разогрева и время достижения этой температуры. Расчетные данные по формуле (2) показывают, что при температуре заливки 1300 °С толщина корки на выходе из кристаллизатора при скорости литья 0,45 м/мин составляет 15 мм, максимальная температура поверхности в зоне разогрева – 1050 °С, время разогрева – 38 с. Моделирование в системе ProCast дает следующие результаты: при идентичной скорости литья 0,45 м/мин толщина корки на выходе из кристаллизатора составляет 11,43 мм, максимальная температура разогрева поверхности – 1106 °С, время разогрева – 82 с.

Причина таких различий очевидна, расчет по формуле (2) не позволяет учитывать влияние конвективного теплообмена на процесс кристаллиза-

ции. Кроме того, на точность результатов оказывает влияние задание характера выделения скрытой теплоты кристаллизации. Перед проведением теоретического анализа необходимо предварительно экспериментально определять вид данной зависимости.

Анализ литературных данных, а также многочисленные экспериментальные данные, полученные в лабораторных условиях и при внедрении процесса на предприятиях, свидетельствуют о том, что использование системы моделирования ProCast позволяет более точно проводить предварительный анализ влияния технологических параметров на стабильность процесса литья.

Таким образом, в результате анализа кинетики формирования непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе и последующего разогрева затвердевшей корки на воздухе получены данные о толщине затвердевшей корки, температуре ее поверхности и средней температуре корки. Определено место расположения наиболее опасного сечения, что особенно важно с точки зрения определения оптимальных технологических параметров литья.

В системе ProCast возможно моделирование процесса литья и на радиальных установках непрерывной разливки стали. Грамотное использование мощного математического аппарата, а также хорошее знание основ теплопередачи, наличие интуиции и творческих способностей позволяют с оптимизмом смотреть на возможность существенного увеличения скорости литья, особенно для заготовок цилиндрического типа, необходимых для изготовления трубных заготовок.

Литература

1. Туттов В. И. Разработка малоотходных процессов непрерывного литья заготовок машиностроения из чугуна: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 1987.
2. Крутилин А. Н. Разработка процесса вертикального непрерывного литья полых машиностроительных заготовок из чугуна: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1987.
3. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. М.: Машгиз, 1960.
4. Туттов В. И., Гринберг В. А., Михалевич А. П. Применение итерационного метода Ньютона для расчета толщины затвердевшей корки // *Металлургия*. Минск: Выш. шк., 1978, Вып. 12. С. 39–42.
5. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. М.: Машиностроение, 1976. Ч. 1.
6. Вейник А. И. Расчет отливки. М.: Машгиз, 1964.
7. Завгородний Н. Ф. Расчет тепловой конвекции в затвердевающей расплаве // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1976. № 1. С. 178–182.
8. Thomson R., Ellwood E. C. Closed head continuous casting British // *Foundryman*. 1972. N 65. P. 186–196.
9. Голод В. М., Нехендзи Ю. А. Определение некоторых теплофизических свойств сплавов по кривым охлаждения // *Теплообмен между отливкой и формой*. Минск: Высш. шк., 1967. С. 179–183.
10. Голод В. М., Дьяченко С. А. Численный расчет затвердевания чугуновых отливок // *Кристаллизация. Теория и эксперимент*. Ижевск: УдГУ, 1987. С. 26–33.
11. Голод В. М., Савельев К. Д. Термодинамика и кинетика кристаллизации чугуна: компьютерный анализ. Приложение к журналу «Литейное производство». 2001. № 12. С. 1–7.
12. Голод В. М., Савельев К. Д., Лушников А. В., Петушин С. Э. Анализ неравновесной кристаллизации на основе термодинамической модели многокомпонентного сплава // *Современные материалы: технологии и исследования*. Тр. СПбГТУ. 1998. С. 3–10.
13. Тихомиров М. Д. Модели литейных процессов в САМ ЛП «Полигон» // *Сб. тр. ЦНИИМ. Литейные материалы, технология, оборудование*. Санкт-Петербург. Вып. 1. 1995. С. 21–26.