



There are given the methods and carried out the calculation of temperature regime of melt in casting ladle of rotary type.

С. В. ГАЛАГАЕВ, А. М. БОДЯКО, ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74.047:746.32

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАСПЛАВА В ЗАЛИВОЧНОМ КОВШЕ

Заливочные ковши поворотного типа широко используются в чугунолитейных цехах при получении отливок широкой номенклатуры в разовых и постоянных формах. В то же время в литературе практически отсутствуют сведения об инженерных методах расчета теплового режима расплава в ковшах данного вида в процессе разливки. Для решения этой важной с практической точки зрения задачи можно с успехом использовать приближенные методы тепловой теории литья, разработанные А.И. Вейником и Г.А. Анисовичем.

Отличительной особенностью поворотного ковша является то, что в процессе разливки вследствие его наклона относительно оси подвеса постоянно меняется не только масса расплава, но и геометрическая форма, которую он принимает. Если в период транспортировки и выдержки, когда ковш не наклонен, расплав имеет достаточно простую геометрическую форму прямого кругового усеченного конуса, то уже при заливке первой отливки он, перетекая в полости ковша, принимает форму наклонного усеченного конуса с непараллельными основаниями. Более того, на заключительной стадии разливки, когда поверхность "зеркала" расплава пересекает дно ковша, геометрическая форма тела, ограничивающего расплавленный металл, становится еще более сложной. Таким образом, для решения поставленной задачи сначала необходимо связать геометрические характеристики тела, ограничивающего расплав, с углом поворота ковша, а затем применить приближенные методы тепловой теории литья для расчета температурного режима расплавленного металла.

Очевидно, что геометрическая форма, которую принимает расплавленный металл, получается при отсечении верхней части ковша плоскостью, совпадающей с "зеркалом" расплава. Данная плоскость проходит через кромку сливного носка под некоторым углом к оси ковша. Для нахождения геометрических характеристик тела, ограничивающего расплавленный металл, можно использовать методы, применяемые в аналитической геометрии при анализе конических сечений [1]. Найдем зави-

симости основных параметров данного сечения от угла наклона ковша. На рис. 1 трапеция $AA'C'C$ представляет собой сечение ковша плоскостью, проходящей через его ось OB . Прямая MN является следом секущей плоскости, совпадающей с положением "зеркала" расплава. Она пересекает образующие конуса в точках C (носик ковша) и G и проходит под углом φ к оси ковша. Впишем в конус сферу, касающуюся плоскости MN и обозначим точку касания с ней буквой F , а с образующими конуса — буквами L и K . Ведем прямоугольную систему координат, поместив ее начало в центр основания усеченного конуса (точка O) и направив ось x вдоль оси OB . Пусть уравнение образующей конуса AB имеет вид $y = k_1x + b_1$, а прямой MN — $y = k_2x + b_2$. Тогда уравнения нормалей в соответствующих точках касания запишутся в виде [2]:

$$y = Y_L - \frac{1}{k_1}(x - X_L), \quad (1)$$

$$y = Y_F - \frac{1}{k_2}(x - X_F). \quad (2)$$

Очевидно, что центр вписанной в круговой конус сферы (точка D) лежит на его оси, т.е. $Y_D = 0$. Тогда из уравнений (1) и (2) получаем следующие соотношения:

$$Y_L = \frac{1}{k_1}(X_D - X_L), \quad (3)$$

$$Y_F = \frac{1}{k_2}(X_D - X_F). \quad (4)$$

Кроме того, центр сферы находится на биссектрисе угла $MGL = \gamma$, образованного прямыми AB и MN . Величину угла γ можно найти как [2]

$$\operatorname{tg}(\gamma) = \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1k_2}, \quad \gamma = \arctg\left(\frac{k_2 - k_1}{1 + k_1k_2}\right). \quad (5)$$

Уравнение прямой, проходящей через точку G под углом $\gamma/2$ к прямой AB , запишем в виде

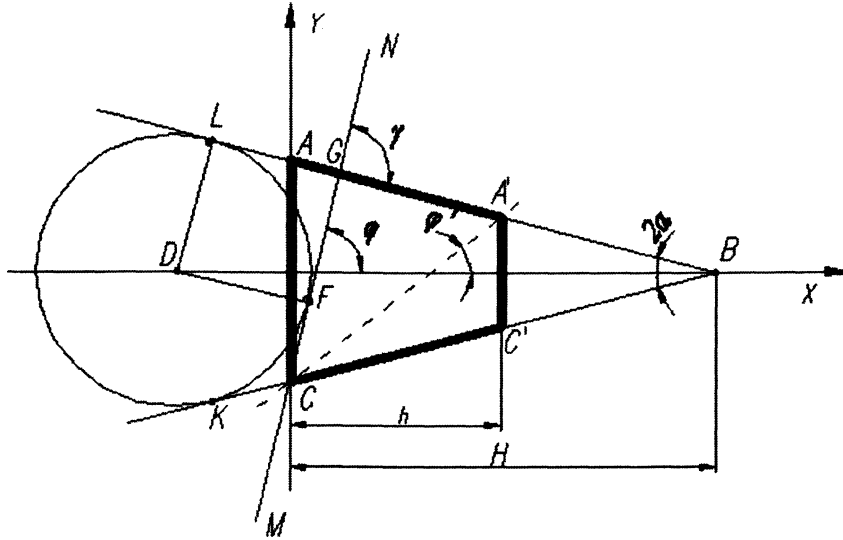


Рис. 1. Схема к расчету геометрических характеристик ковша

$$y = Y_G + \frac{\operatorname{tg}(\gamma/2) + k_1}{1 - k_1 \operatorname{tg}(\gamma/2)} (x - X_G). \quad (6)$$

Координаты точки G можно найти из условия пересечения прямых MN и AB:

$$X_G = \frac{b_1 - b_2}{k_2 - k_1}, \quad Y_G = \frac{k_2 b_1 - k_1 b_2}{k_2 - k_1},$$

или с учетом того, что $b_1 = R$, а $b_2 = -R$, где R – радиус верхнего контура ковша по футеровке, получаем

$$X_G = \frac{2R}{k_2 - k_1}, \quad Y_G = \frac{R(k_2 + k_1)}{k_2 - k_1}. \quad (7)$$

Поскольку $Y_D = 0$, значение X_D определим из уравнения (6):

$$X_D = X_G - \frac{1 - k_1 \operatorname{tg}(\gamma/2)}{k_1 + \operatorname{tg}(\gamma/2)} Y_G. \quad (8)$$

Из геометрических соображений можно записать

$$(X_D - X_L)^2 + Y_L^2 = (X_D - X_F)^2 + Y_F^2, \quad (9)$$

$$Y_L = (H - X_L) \operatorname{tg}(\alpha), \quad (10)$$

где H – полная высота конуса; α – половина угла при вершине конуса.

Выражения (3), (4) и (9), (10) образуют систему уравнений, решение которой позволяет найти координаты точек F и L. Учитывая, что $k_1 = -\operatorname{tg}(\alpha)$, а $k_2 = \operatorname{tg}(\varphi)$, окончательно получаем

$$X_L = \frac{X_D + R \operatorname{tg}(\alpha)}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)}, \quad (11)$$

$$Y_L = \frac{R - X_D \operatorname{tg}(\alpha)}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)}, \quad (12)$$

$$X_F = X_D + (H - X_D) \operatorname{tg}(\varphi) \operatorname{tg}(\alpha) \sqrt{\frac{1}{(1 + \operatorname{tg}^2(\varphi))(1 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}}, \quad (13)$$

$$Y_F = -Y_L \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)}}, \quad (14)$$

$$X_D = \frac{R}{\operatorname{tg}(\varphi) + \operatorname{tg}(\alpha)} \left(2 - \frac{(\operatorname{tg}(\varphi) - \operatorname{tg}(\alpha))(1 + \operatorname{tg}^2(\alpha))}{\operatorname{tg}(\gamma/2) - \operatorname{tg}(\alpha)} \right). \quad (15)$$

Знание координат характерных точек позволяет найти неизвестные значения коэффициентов канонического уравнения эллипса, расположенного в сечении ковша плоскостью, совпадающей со свободной поверхностью расплава. В соответствии с [1] выражения для большой (a) и малой (b) полуосей эллипса имеют вид:

$$a = \frac{\omega p}{(1 - \omega^2)}, \quad b^2 = \frac{\omega^2 p^2}{1 - \omega^2}, \quad (16)$$

где $p = MF = MC + CF$ – расстояние от фокуса эллипса до директрисы; $\omega = CF/MC$ – эксцентриситет конического сечения. Значения p и ω легко определить, так как координаты точек $F(X_F, Y_F)$ и $C(0, -R)$ уже известны, а точки M находятся из геометрических соображений:

$$X_M = X_L, \quad Y_M = X_L \operatorname{tg}(\varphi) - R. \quad (17)$$

Нахождение выражений для a(φ) и b(φ) в явном виде нецелесообразно ввиду их чрезвычайной громоздкости. Для практического использования соответствующие зависимости проще представить в виде регрессионных полиномов. В частности, для ковша емкостью 160 кг, имеющего диаметр по верху 0,39 м, по дну 0,23 м, глубину 0,45 м и угол при вершине конуса $2\alpha = 21'30''$ (размеры приведены для внутренней полости ковша), с помощью электронных таблиц Excel получены следующие выражения:

$$a = 0,773 - 2,93\varphi_1 + 6,075\varphi_1^2 - 5,99\varphi_1^3 + 2,296\varphi_1^4, \quad \text{м}, \quad (18)$$

$$b = -0,4452 + 7,463\varphi_1 - 39,0525\varphi_1^2 + 106,806\varphi_1^3 - 157,31\varphi_1^4 + 118,298\varphi_1^5 - 35,611 \cdot \varphi_1^6, \text{ м}, \quad (19)$$

где $\varphi_1 = \frac{\varphi}{100}$ (здесь и далее $90^\circ \geq \varphi > \alpha$).

В процессе разливки угол наклона “зеркала” расплава к оси ковша изменяется от $\varphi_{\text{нач}}$ (определяется уровнем расплава в ковше к началу разливки) до α к моменту его полного опорожнения. При $\varphi = \varphi'$ плоскость “зеркала” касается днища ковша, а при $\varphi' > \varphi > \alpha$ пересекает его. При $\varphi = \alpha$ плоскость “зеркала” расплава опять касается днища, но уже с противоположной стороны, при этом след секущей плоскости совпадает с образующей конуса. Когда $\varphi_{\text{нач}} \geq \varphi \geq \varphi'$, сечение ковша представляет собой полный эллипс и площадь свободной поверхности расплава находится как

$$S_{\text{эл}} = \pi ab. \quad (20)$$

При $\varphi' > \varphi > \alpha$ площадь поверхности “зеркала” можно определить из выражения [2]

$$S'_{\text{эл}} = \frac{1}{2} \pi ab + \frac{b}{a} \left(x_1' \sqrt{a^2 - x_1'^2} + a^2 \arcsin \frac{x_1'}{a} \right), \quad (21)$$

где $x_1' = \frac{h}{\cos(\varphi)} - a$ — расстояние от центра симметрии эллипса до пересечения с днищем ковша; h — глубина ковша. Для указанного выше заливочного ковша зависимость $S_{\text{эл}}(\varphi)$ также была получена в виде регрессионного полинома:

$$S_{\text{эл}} = -1909 + 2706\varphi_2 - 868,9\varphi_2^2 + 130,86\varphi_2^3 - 9,477\varphi_2^4 + 0,2695\varphi_2^5, \times 10^{-4}, \text{ м}^2, \quad (22)$$

где $\varphi_2 = \frac{\varphi}{10}$.

Объем расплава, находящегося в ковше при данном угле поворота ($\varphi_{\text{нач}} \geq \varphi \geq \varphi'$):

$$V_{\text{мет}} = V_1 - V_2, \quad (23)$$

где $V_1 = \frac{1}{3} S_{\text{эл}} H \cos(\alpha) \sin(\varphi - \alpha)$ — полный объем

наклонного конуса; $V_2 = \frac{1}{3} \pi r^2 (H - h)$ — объем верхней части конуса; r — радиус днища ковша. При $\varphi' > \varphi > \alpha$ с помощью аналитических методов найти выражения для оценки объема расплава в ковше, а также для площади его контакта с огнеупорной футеровкой не представляется возможным. Для этих целей использовали вычисли-

тельные возможности систем автоматизированного проектирования с последующей регрессионной обработкой полученных результатов в среде Excel. Для ковша емкостью 160 кг зависимости $V_{\text{мет}}(\varphi)$ и $S_{\text{бок}}(\varphi)$ имеют вид:

$$V_{\text{мет}} = 4596 - 10058\varphi_2 + 6790,3\varphi_2^2 - 1332,05\varphi_2^3 + 117,634\varphi_2^4 - 3,8974\varphi_2^5, \times 10^{-6}, \text{ м}^3, \quad (24)$$

$$S_{\text{бок}} = -1093 + 1305,6\varphi_2 - 116,86\varphi_2^2 + 5,045\varphi_2^3, \times 10^{-4}, \text{ м}^2. \quad (25)$$

Перейдем к рассмотрению тепловой задачи. Полагаем, что неоднородностью распределения температуры в объеме расплава в данном случае можно пренебречь, поскольку в результате естественной конвекции и периодических реверсивных поворотов ковша для дозированного выпуска расплавленного металла наблюдается достаточно интенсивное его перемешивание. Это позволяет значительно упростить постановку задачи и применить для ее решения хорошо разработанные приближенные методы тепловой теории литья. Составим уравнение теплового баланса для расплава:

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 + \Delta Q_3, \quad (26)$$

где ΔQ_1 — общее количество теплоты, потерянное расплавом за некоторый период времени Δt ; ΔQ_2 — отведенное через поверхность контакта с футеровкой ковша; ΔQ_3 — потерянное со свободной поверхности расплава. Значение ΔQ_1 находим как:

$$Q_1 = -c_1 \rho_1 V_{\text{мет}} \Delta \vartheta_{\text{м}}, \quad (27)$$

где c_1 и ρ_1 — удельная теплоемкость и плотность расплава; $\Delta \vartheta_{\text{м}}$ — изменение температуры расплавленного металла за время Δt . Для расчета теплообмена расплава с футеровкой ковша используем расчетные формулы, полученные в работе [3]. Так как толщина теплоизолирующей облицовки обычно существенно меньше среднего радиуса внутренней полости ковша (для рассматриваемого ковша $X_2 / R_{\text{ср}} = 0,035 / 0,155 = 0,23$), ее можно считать термически плоской. Тогда на этапе прогрева футеровки ($t \leq t_0$) ΔQ_2 представляет собой приращение теплоты, аккумулированной футеровкой за время Δt , и находится из уравнения:

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_{\text{ак}, i} - \Delta Q_{\text{ак}, i-1} = \frac{1}{n+1} F_{\text{к}} \rho_2 c_2 \vartheta_{\text{п}} (X_i - X_{i-1}), \quad (28)$$

где $F_{\text{к}}$ — площадь поверхности контакта расплава с футеровкой ковша; ρ_2, c_2 — плотность и удельная теплоемкость материала футеровки; $\vartheta_{\text{п}}$ — относительная температура поверхности контакта

“расплав – футеровка”; n – показатель степени параболы, аппроксимирующей распределение температур в футеровке. Глубину прогрева огнеупорной футеровки X определяем по выражению:

$$X = \sqrt{2n(n+1)a_2t}, \quad (29)$$

где a_2 – коэффициент температуропроводности материала футеровки ковша.

Длительность прохождения фронта температур через стенку ковша t_0 находим из уравнения (29), подставляя вместо X толщину слоя огнеупорной футеровки X_2 :

$$t_0 = \frac{X_2^2}{2n(n+1)a_2}. \quad (30)$$

После прогрева стенки ковша теплота, проходящая через поверхность контакта с расплавом, расходуется на разогрев футеровки и кожу ковша, а также отводится с его наружной поверхности в окружающую среду конвекцией и излучением. Ввиду относительно небольшой толщины стального кожура (X_3) перепадом температуры по его сечению пренебрегаем. Избыточная температура (ϑ_2) на наружной поверхности данной двухслойной формы может быть найдена из следующего выражения [3]:

$$\vartheta_2 = \vartheta_{\text{пср}} G \left(1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{g}\right) \right), \quad (31)$$

$$\text{где } G = \frac{n}{n + Bi_2}; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_{\text{эф}3} X_2}{\lambda_2};$$

$$g = \frac{\frac{n}{n+1} X_2 \rho_2 c_2 + X_3 \rho_3 c_3}{\frac{n\lambda_2}{X_2} + \alpha_{\text{эф}3}}; \quad \lambda_2 - \text{коэффициент теп-}$$

лопроводности материала футеровки; $\vartheta_{\text{пср}}$ – среднее значение температуры на поверхности контакта “расплав – футеровка” за время t ; ρ_3 и c_3 – плотность и удельная теплоемкость материала кожура; F_a – площадь наружной поверхности ковша. Значение эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{эф}3}$ находим из выражения:

$$\alpha_{\text{эф}3} = \frac{C_3 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_2} + \alpha_3, \quad (32)$$

где α_3 и C_3 – соответственно коэффициент теплоотдачи конвекцией и коэффициент излучения на наружной поверхности ковша; T_2 и T_c –

температуры на наружной поверхности футеровки и окружающей среды, измеренные по абсолютной шкале. По мере разогрева футеровки значения показателя параболы n изменяются. Соответствующая критериальная зависимость из [3] может быть представлена в виде

$$n = 2,944 - 2,063\theta + 1,196\theta^2, \quad (33)$$

$$\text{где } \theta = Fo_2 \frac{\vartheta_{\text{кр}} - \vartheta_2}{\vartheta_{\text{кр}}}; \quad Fo_2 = \frac{a_2(t-t_0)}{X_2^2}; \quad \vartheta_{\text{кр}} - \text{избы-}$$

точная температура кристаллизации.

Условия теплообмена на свободной поверхности расплава в ковше в процессе разлива отличаются большой сложностью. Здесь наблюдается теплоотдача конвекцией и излучением, причем последняя сопровождается теплообменом с поверхностью огнеупорной футеровки, свободной от контакта с расплавом. Если учесть, что как площади, так и взаимное расположение указанных поверхностей изменяются в процессе разлива, то расчет теплоотдачи излучением с “зеркала” расплава представляет отдельную достаточно сложную задачу, решение которой возможно только с использованием численных методов. Однако для практических расчетов технологии литья представляется допустимым ввести некоторый поправочный коэффициент ψ , учитывающий отклонение реальных условий лучистого теплообмена со свободной поверхности расплава от закона интегрального полусферического излучения. С учетом принятых упрощений выражение для ΔQ_3 можно записать в виде:

$$\Delta Q_3 = \alpha_{\text{эф}1} (T_{\text{Мср}} - T_c) F_{\text{зк}} \Delta t, \quad (34)$$

где $T_{\text{Мср}}$ – среднее за время Δt значение температуры расплава; $F_{\text{зк}} = S_{\text{эл}}$ – площадь “зеркала”, равная в данном случае общей площади поверхности расплава, не контактирующего с футеровкой ковша; $\alpha_{\text{эф}1}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{эф}1} = \frac{\psi C_1 \left[\left(\frac{T_{\text{Мср}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{Мср}} - T_c} + \alpha_1, \quad (35)$$

где C_1 – коэффициент излучения; α_1 – коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности расплава.

На практике свободную поверхность расплава в ковше часто присыпают слоем сухого кварцевого песка или иного огнеупорного материала для снижения тепловых потерь в процессе транспортировки металла к позиции разлива. Оценку температуры на свободной поверхности теплоизолирующей присыпки ($T_{\text{ш}}$) и количества отведенной с поверхности расплава теплоты можно вести на основе выражений (28)–(31), (33)–(35). При

этом полагаем $X_3=0$ и подставляем вместо ϑ_2 и $\alpha_{эф3}$ соответственно $\vartheta_{ш}$ и $\alpha'_{эф1}$, а вместо параметров огнеупорной футеровки — характеристики присыпки или шлаковой корки. В уравнениях (34), (35) заменяем $T_{Мср}$ на $T_{ш}$, $F_{зк}$ на $F_{ш}$, а $\alpha_{эф1}$ на $\alpha'_{эф1}$. Величину $\alpha'_{эф1}$ находим из (35), вводя вместо C_1 значение C'_1 , соответствующее коэффициенту излучения с поверхности шлаковой корки.

Можно считать, что теплоизолирующий слой на поверхности расплава сохраняется до начала операции разливки. В процессе литья методом НЦЛН вследствие ошлаковывания присыпки, снятия части шлака перед началом заливки, перемещения расплава при реверсивных поворотах ковша и понижения его уровня происходит разрыв шлаковой корки, а также постепенный унос шлака с заливаемым расплавом. В результате часть поверхности расплава начинает контактировать непосредственно с окружающей средой, а доля

поверхности, покрытой шлаком ($k_{ш} = F_{ш}/S_{зл}$),

постепенно уменьшается, поскольку теплоизолирующая присыпка в процессе разливки не добавляется. Общее количество теплоты, отведенной со свободной и покрытой шлаком поверхностей, можно определить на основе принципа аддитивности. Количество теплоты, отведенной с покрытой шлаком и свободной поверхностей, находится при подстановке в уравнение (34) $F_{ш} = k_{ш}S_{зл}$ или $F_{зк} = S_{зл}(1 - k_{ш})$

вместо $F_{зк}$ при соответствующей корректировке $\alpha_{эф1}$ в уравнении (35). Величина $k_{ш}$ непостоянна в процессе разливки, но может быть достаточно просто найдена из эксперимента как функция времени или остаточной массы расплава в ковше.

Расчет температурного режима расплава в ковше на основании предложенных выражений можно проводить методом последовательных приближений. Начиная отсчет времени от окончания заполнения ковша расплавом, из (28)–(35) определяем значения $\vartheta_2(t)$ и $\vartheta_{ш}(t)$. Так как затвердевания металла на поверхности футеровки ковша ввиду высокого перегрева расплава и конвективного перемешивания не наблюдается, считаем, что $\vartheta_{Пср} = \vartheta_{Мср}$. Полагая $\vartheta_{Мср} = \vartheta_{Мвып}$ ($\vartheta_{Мвып}$ — температура расплава при выпуске из печи), из уравнения (27) находим величину $\Delta\vartheta_{М}$. Уточняем значение $\vartheta_{Мср} = \vartheta_{Мвып} + \Delta\vartheta_{М}/2$ и повторяем расчет до достижения требуемой точности в оценке температуры расплава. Практика показывает, что двух приближений оказывается вполне достаточно, чтобы отклонения в значениях $\vartheta_{М}$ не превышали 0,2%.

Для примера выполним пробный расчет температурного режима расплава в поворотном ковше при литье методом НЦЛН заготовок гильз Д-245. На основании эксперимента принимаем, что длительность транспортировки ковша от печи на позицию разливки составляет 120 с, толщина слоя теплоизолирующей присыпки из сухого кварцевого песка равна 5 мм. Общая продолжительность первоначального заполнения металлопровода с кристаллизатором и выдержки для намораживания первой отливки равна 60 с, а средняя длительность намораживания последующих отливок 30 с. Для используемой технологической оснастки масса металла, находящегося в заполненных металлопроводе и кристаллизаторе, равна 56,7 кг, а масса отливки — 16,5 кг. Полагаем, что температура расплава в ковше после выпуска из печи во всех случаях постоянна и составляет 1480 °С. В качестве шага по времени выбираем среднюю длительность намораживания литой заготовки. Результаты расчетов теплового режима расплава в двух последовательно разливаемых ковшах, выполненные с использованием электронных таблиц Excel, представлены на рис. 2. Здесь учитывали, что разливка второго ковша начинается при уже заполненном металлопроводе после 60-секундного простоя, связанного с ожиданием окончания опорожнения первого ковша. Характер полученных кривых находится в хорошем соответствии с экспериментом. Средний темп падения температуры расплава в интервале 1400–1200 °С в поворотном ковше емкостью 160 кг при литье заготовок гильз Д-245 методом НЦЛН составляет 0,46–0,50 град/с, а при выдержке полного ковша с теплоизолирующим слоем шлака на свободной поверхности — 0,18–0,21 град/с.

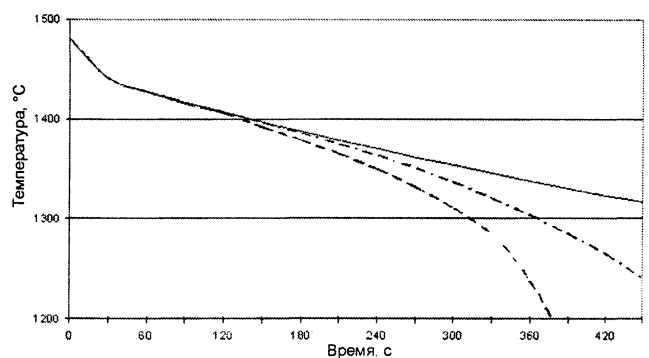


Рис. 2. Температурный режим расплава в ковше при литье заготовок гильз Д-245: ————— выдержка полного ковша; — — — — разливка ковша №1; — — — — разливка ковша №2

Литература

1. Погорелов А.В. Аналитическая геометрия. М.: Наука, 1968.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970.
3. Анисович Г.А. Затвердевание отливок Мн.: Наука и техника, 1979.