



The methods of calculation of duration of the metallic bricks heating and melting in liquid bath, taking into account variability of thermal-physical characteristics of metal due to temperature, is developed.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси,
Ю. С. ПОСТОЛЬНИК, Днепродзержинский государственный технический университет,
Д. Н. АНДРИАНОВ, БИТУ,
О. А. КОНДРАШЕВА, Днепродзержинский государственный технический университет,
Р. Б. ВАЙС, БИТУ

УДК 669.187

АНАЛИЗ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БРИКЕТОВ В ЖИДКОЙ ВАННЕ. СООБЩЕНИЕ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ БРИКЕТОВ В СОВРЕМЕННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ

В [1] отмечено, что основным критерием эффективности использования брикетов в сталеплавильном процессе является их угар, определяемый технологией ведения плавки, последовательностью их загрузки в процессе выплавки, а также размерами и теплофизическими свойствами металлических брикетов. При этом расчетная продолжительность плавления брикетов во многом определяется тем, насколько исходные теплофизические характеристики соответствуют их реальным значениям в процессе нагрева и последующего расплавления.

В статье приведены результаты анализа продолжительности плавления брикетов на примере стали ШХ15 в дуговой сталеплавильной печи. Математическая формулировка и решение задачи плавления металлических брикетов (кускового лома) с использованием «метода эквивалентных источников» даны в работах [1, 2].

Для расчета продолжительности процесса прогрев-нагрев-плавление брикетов (без шлама и со шламом) стали ШХ15 были приняты следующие исходные данные: размер брикета $H=2h=64; 80; 96$ мм; начальная температура $T_0=293$ К; температура плавления брикета $T_\phi=1743$ К; температура перегрева металла $T_c=1873$ К; скрытая теплота плавления $q_\phi=272$ кДж/кг. Коэффициент теплообмена α_x варьировали от 0,5 до 15 кВт/(м²·К).

Теплофизические характеристики, согласно справочным данным [3] и линейной аппроксимации, определяли функциями:

$$\lambda(T)=43,5-1,53 \cdot 10^{-2}(T-T_0), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \quad \varepsilon_\lambda=-0,51,$$

$$\begin{aligned} c_p(T) &= 527,6 + 0,127(T-T_0), \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ c_{p\lambda}(T) &= 4157 + 0,786(T-T_0), \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad \varepsilon_c=0,274, \\ \rho(T) &= 7879 - 0,324(T-T_0), \text{ кг/м}^3, \\ \rho_c(T) &= 6192 - 0,255(T-T_0), \text{ кг/м}^3, \\ \rho_{6/m}(T) &= 5819 - 0,239(T-T_0), \text{ кг/м}^3, \\ c_6^V(T) &= 3267 + 0,618(T-T_0), \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad \varepsilon_c=0,274, \\ c_{6/m}^V(T) &= 3070 + 0,580(T-T_0), \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad \varepsilon_c=0,274. \end{aligned}$$

Запишем граничные условия на стадии предварительного нагрева ($0 \leq \tau \leq \tau_\phi^0$) следующим образом:

инерционный этап

$$\left. \begin{aligned} (1 + \varepsilon_\lambda \theta_{1n}) \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} &= \text{Bi} [\theta_c - \theta_{1n}(\tau)], \\ \theta_1(\xi, \tau) \Big|_{\xi=\beta_1(\tau)} &= 0, \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\beta_1(\tau)} = \theta, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

регулярный этап

$$\left. \begin{aligned} (1 + \varepsilon_\lambda \theta_{2n}) \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} &= \text{Bi} [\theta_c - \theta_{2n}(\tau)], \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0, \\ \theta_2(\xi, \tau_0) \Big|_{\xi=0} &= \theta_{2n}^0 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь введены безразмерные величины

$$\theta(\xi, \tau) = \frac{T(\xi, \tau) - T_0}{T_\phi - T_0}, \quad \xi = \frac{x}{h}, \quad \beta_j(\tau) = \frac{B_j(\tau)}{h},$$

$$\tau = \frac{a_0 t}{h^2}, \quad \text{Bi} = \frac{\alpha_k h}{\lambda_0}, \quad \text{Ko} = \frac{q_\phi}{c_p^0 (T_\phi - T_0)}, \quad K_T = \frac{T_c - T_\phi}{T_\phi - T_0},$$

$B_j(\tau)$ – непрогретая зона, м.

Опуская полное решение задачи плавления, приведенное в работах [1, 2] с учетом граничных условий (1), (2), приведем лишь ту его часть, в соответствии с которой определяется время прогрева (τ_0), нагрева (τ_ϕ^0) и плавления (τ_ϕ):

$$\tau_0 = [1 - 0,15(\epsilon_\lambda - \epsilon_c) \text{Bi} K_T] / 6, \quad (3)$$

$$\Delta\tau_\phi^0 = \tau_\phi^0 - \tau_0 = \frac{1 - \theta_n^0}{\text{Bi} K_T} \sum_{i=1}^3 \delta_{\phi i}, \quad (4)$$

где

$$\delta_{\phi 1} = 1 + \epsilon_c \frac{1 + \theta_n^0}{2};$$

$$\delta_{\phi 2} = \frac{\epsilon_\lambda - \epsilon_c}{3(1 + \epsilon_\lambda)} \frac{\text{Bi} K_T}{(1 + \epsilon_\lambda \theta_n^0)};$$

$$\delta_{\phi 3} = \frac{\epsilon_\lambda \epsilon_c}{5(\epsilon_\lambda - \epsilon_c)} [2 + \epsilon_\lambda (1 + \theta_n^0)] \delta_{\phi 2}^2;$$

$$\theta_n^0 = \frac{1}{\epsilon_\lambda} (\sqrt{1 + \epsilon_\lambda \text{Bi} K_T} - 1);$$

$$\Delta\tau_\phi = \frac{1 + \epsilon_c}{3(1 + \epsilon_\lambda)} + \frac{\text{Ko}}{\text{Bi} K_T}.$$

При этом продвижение фронта $\beta_3(\tau)$ плавления определяется нелинейным уравнением

$$\frac{\text{Ko}}{\text{Bi} K_T} [1 - \beta_3(\tau)] + \frac{1 + \epsilon_c}{3(1 + \epsilon_\lambda)} [1 - \beta_3^n(\tau)] = \tau - \tau_\phi^0, \quad (5)$$

где $n = 2 \left(1 + 3 \frac{1 + \epsilon_\lambda}{1 + \epsilon_c} \frac{\text{Ko}}{\text{Bi} K_T} \right).$

В работах [4–6] указывается, что закон продвижения фронта плавления носит нелинейный

по времени характер только в начальной стадии процесса (примерно при $\beta_3(\tau) > 0,7$). Это подтверждает высокая степень n нелинейного члена, что позволяет опустить начальную стадию и представить выражение (5) в виде

$$\frac{\text{Ko}}{\text{Bi} K_T} [1 - \beta_3(\tau)] + \frac{1 + \epsilon_c}{3(1 + \epsilon_\lambda)} = \tau - \tau_\phi^0. \quad (6)$$

Авторы работы [6], рассматривая числовой пример с постоянными теплофизическими свойствами при $\text{Bi}=10, K_T=0,2, \text{Ko}=4,1$, приводят данные численного решения поставленной задачи методом конечных разностей, а для линейного участка продвижения фронта $\beta_3(\tau)$ получают уравнение

$$(\tau - \tau_\phi^0) + 2,05\beta_3(\tau) - 2,341 = 0. \quad (7)$$

При тех же данных решение «методом эквивалентных источников» (6) дает выражение

$$(\tau - \tau_\phi^0) + 2,05\beta_3(\tau) - 2,383 = 0. \quad (8)$$

Очевидно, что уравнения (7) и (8) практически совпадают (расхождение во времени $\Delta\tau_\phi$ (при $\beta_3 = 0$) составляет 1,76%), что свидетельствует о том, что приведенные формулы не искажают имеющиеся представления об исследуемом процессе.

На первом этапе проведены расчеты по упрощенным формулам, не учитывающим термическую чувствительность материала. Полагая в (3), (4) $\epsilon_\lambda = \epsilon_c = 0$, запишем

$$\tau_0 = 1/6, \quad \theta_n^0 = \text{Bi}_0 K_T / 2,$$

$$\Delta\tau_\phi^0 = \frac{2 - \text{Bi}_0 K_T}{\text{Bi}_0 K_T}, \quad \Delta\tau_\phi = \frac{\text{Bi}_0 + 3\text{Ko}^0}{\text{Bi}_0 K_T}, \quad \tau_\phi = \frac{1 + \text{Ko}^0}{\text{Bi}_0 K_T}. \quad (9)$$

При этом возможны варианты, когда используются значения теплофизических характеристик, соответствующие начальной (T_0), конечной (T_ϕ) или средней $[\bar{T} = (T_0 + T_\phi) / 2]$ температуре. Ниже приведены результаты расчетов для трех случаев (табл. 1–3).

Таблица 1. Продолжительность (t_ϕ , мин) плавления брикетов стали ШХ15 при начальных значениях теплофизических характеристик

Вид брикетов	$h \cdot 10^3, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$					
		0,5	1,0	2,5	5,0	10,0	15,0
Без шлама $a_0 = 4,72 \text{ м}^2/\text{ч}$	32	53,02	26,47	10,60	5,30	2,65	1,77
	40	66,27	33,08	13,22	6,63	3,31	2,21
	48	79,66	39,79	15,93	7,97	3,98	2,65
Со шламом $a_0 = 5,05 \text{ м}^2/\text{ч}$	32	49,76	24,84	9,95	4,98	2,48	1,66
	40	61,99	30,96	12,37	6,20	3,10	2,07
	48	74,50	37,21	14,90	7,45	3,72	2,48

Таблица 2. Продолжительность (t_{ϕ} , мин) плавления брикетов стали ШХ15 при значениях теплофизических характеристик, соответствующих T_{ϕ}

Вид брикетов	$h \cdot 10^3, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$					
		0,5	1,0	2,5	5,0	10,0	15,0
Без шлама $a_{\phi} = 1,59 \text{ м}^2/\text{ч}$	32	71,28	36,59	14,26	7,13	3,57	2,38
	40	89,33	44,61	17,87	8,93	4,46	2,98
	48	106,6	53,54	21,40	10,71	5,35	3,57
Со шламом $a_{\phi} = 1,69 \text{ м}^2/\text{ч}$	32	67,21	33,63	13,44	6,72	3,36	2,24
	40	84,00	41,95	16,80	8,40	4,20	2,80
	48	100,3	50,40	20,14	10,08	5,04	3,36

Таблица 3. Продолжительность (t_{ϕ} , мин) плавления брикетов стали ШХ15 при значениях теплофизических характеристик, соответствующих \bar{T}

Вид брикетов	$h \cdot 10^3, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$					
		0,5	1,0	2,5	5,0	10,0	15,0
Без шлама $\bar{a} = 3,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{ч}$	32	56,51	28,25	11,28	5,65	2,83	1,88
	40	70,57	35,22	14,14	7,06	3,53	2,35
	48	90,03	45,08	18,03	9,00	4,51	3,00
Со шламом $\bar{a} = 3,37 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{ч}$	32	53,01	26,52	10,58	5,30	2,65	1,77
	40	66,38	33,13	13,30	6,64	3,32	2,21
	48	76,56	39,84	15,94	7,95	3,98	2,65

На последующем этапе выполнены расчеты продолжительности t_{ϕ} плавления по формулам (3), (4), учитывающей непрерывное изменение теплофизических характеристик. При этом заметим, что параметры нелинейности 1-го рода ϵ_{λ} и ϵ_c одинаковы для брикетов без шлама и со шламом ($\epsilon_{\lambda} = -0,51$, $\epsilon_c = 0,274$). Все входящие в формулы (3), (4) критерии и числа соответствуют, согласно постановке исходной задачи, начальной температуре $T_0 = 293 \text{ К} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\theta_n^0 = (1 - \sqrt{1 - 0,51 Bi_0 K_T}) / 0,51, \quad (10)$$

$$\tau_0 = [1 + 0,15(0,51 + 0,274) Bi_0 K_T] / 6, \quad (11)$$

$$\Delta \tau_{\phi}^0 = (1 - \theta_n^0) / (Bi_0 K_T), \quad (12)$$

$$\delta_{\phi 1} = 1 + 0,274(1 + \theta_n^0) / 2, \quad (13)$$

$$\delta_{\phi 2} = \frac{(0,51 + 0,274) Bi_0 K_T}{3(1 - 0,51) 1 - 0,51 \theta_n^0} = 0,5333 \frac{Bi_0 K_T}{1 - 0,51 \theta_n^0}, \quad (14)$$

$$\delta_{\phi 3} = \frac{2 \cdot 0,51 - 0,274}{5(0,51 + 0,274)} \left(1 - 0,51 \frac{1 + \theta_n^0}{2} \right) \delta_{\phi 2}^2 = 0,0713 [1 - 0,251(1 + \theta_n^0)] \delta_{\phi 2}^2, \quad (15)$$

$$\Delta \tau_{\phi}^0 = \Delta \tau_{\phi}^0 (\delta_{\phi 1} - \delta_{\phi 2} + \delta_{\phi 3}), \quad (16)$$

$$\Delta \tau_{\phi} = \frac{1}{3} \frac{1,274}{1 - 0,51} + \frac{0,354}{Bi_0 K_T}, \quad (17)$$

$$\tau_{\phi} = \tau_0 + \Delta \tau_{\phi}^0 + \Delta \tau_{\phi}. \quad (18)$$

Анализ результатов расчетов этих величин показал, что в формулах (4), (16) слагаемыми $\delta_{\phi 3}$ можно пренебречь, так как они начинают проявлять себя лишь при больших значениях α_k и h .

В табл. 4 приведены результаты окончательных расчетов полного времени t_{ϕ} (мин) протекания процесса прогрев-нагрев-плавление брикетов стали ШХ15 как без шлама, так и со шламом при переменных теплофизических характеристиках, а на рисунке – качественная картина изменения продолжительности плавления брикета стали ШХ15 (без шлама) от интенсивности теплообмена (α_k), отражающая зависимость (нелинейную по КТО α_k и линейную по размерам и размеров брикета h) продолжительности процесса с учетом термической чувствительности материала брикетов.

Анализ сопоставления приведенных результатов (табл. 4) с данными, полученными с допущением о постоянстве теплофизических характеристик при заданной температуре (см. табл. 1–3), показывает, что результаты расчета продолжи-

Таблица 4. Продолжительность $t_{\phi} = \tau_{\phi} k_{\tau}^0$ (мин) плавления брикетов стали ШХ15 с учетом термической чувствительности материала

Вид брикетов	$h \cdot 10^3, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$					
		0,5	1,0	2,5	5,0	10,0	15,0
Без шлама $a_0 = 4,72 \text{ м}^2/\text{ч}$	32	58,3	29,6	11,7	5,9	3,0	2,1
	40	72,4	36,5	14,6	7,4	3,9	2,8
	48	87,7	44,5	17,6	8,9	4,9	3,8
Со шламом $a_0 = 5,05 \text{ м}^2/\text{ч}$	32	54,7	27,8	11,0	5,5	2,8	2,0
	40	67,8	34,1	13,6	6,9	3,6	2,7
	48	82,0	41,6	16,5	8,4	4,6	3,6

тельности процесса прогрев–нагрев–плавление существенно зависят от того, при каких температурах величины теплофизических свойств были приняты за расчетные.

При этом если принять за наиболее близкие к истинным результаты расчета с переменными теплофизическими характеристиками, то по сравнению с ними упрощенные расчеты при постоянных характеристиках дают в определении времени t_{ϕ} (в данном случае – для брикетов стали ШХ15) следующие средние погрешности:

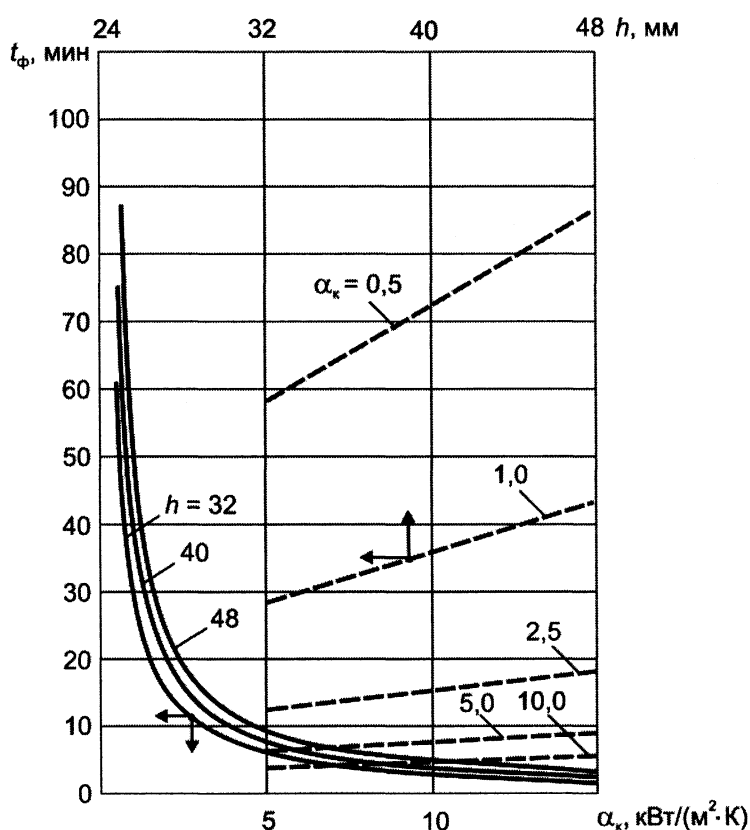
- при теплофизических свойствах, соответствующих $T = T_0$, отмечается уменьшение времени процесса на 10–12%;
- при теплофизических свойствах, соответствующих $T = T_{\phi}$, увеличение времени на 18–22%;
- при теплофизических свойствах, соответствующих $T = \bar{T}$, уменьшение времени на 3–4%.

Эта закономерность наблюдается при значении коэффициента теплообмена $\alpha_k \leq 5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В случае увеличения α_k погрешности в первом и третьем случаях возрастают, а во втором – снижаются. Это объясняется тем, что при больших α_k основная доля общего времени t_{ϕ} тратится именно на непосредственное плавление, когда характеристики материала соответствуют температуре T_{ϕ} .

Выводы. Разработана методика расчета продолжительности нагрева и плавления металлических брикетов в жидкой ванне, учитывающая переменность теплофизических свойств металла от температуры. С использованием методики выполнен расчетный анализ влияния теплофизических характеристик стали, интенсивности теплообмена и размеров брикета на продолжительность плавления.

Литература

1. Тимошпольский В.И., Постольник Ю.С., Мандель Н.Л., Кондрашева О.А. Анализ переноса теп-



Зависимость продолжительности плавления брикета стали ШХ15 (без шлама) от интенсивности теплообмена (α_k) и размеров брикета (h) с учетом переменности теплофизических характеристик

лоты при плавлении металлических брикетов в жидкой ванне. Сообщение 1. Математическое моделирование // Литье и металлургия. 2006. №1. С. 108–110.

2. Тимошпольский В.И., Постольник Ю.С., Андрианов Д.Н. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии. Мн.: Белорусская наука, 2005.

3. Теплофизические свойства веществ: Справ. / Под ред. Н.Б. Варгафтика. М.:Л.: Госэнергоиздат, 1956.

4. Бровкин Л.А. Расчет процессов плавления простейших тел // Изв. вузов. Энергетика. 1958. № 2. С. 79–86.

5. Гольдфарб Э.М. Динамика плавления шихты в плавильных печах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1960. № 11. С. 156–166.

6. Волков В.Н., Рыбаков Г.Н., Смирнов Г.М. Об одном простом методе расчета динамики плавления неограниченной пластины // Исследования по теплопроводности. Мн.: Наука и техника, 1967. С. 293–297.