

УДК 536.2: 539.3

## РАСЧЕТЫ ПЛАВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ БРИКЕТОВ В ЖИДКОЙ ВАННЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА. СООБЩЕНИЕ 2. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО БРИКЕТА

**Постольник Ю.С.**, *д.т.н., профессор*

**Тимошпольский В.И.**<sup>1</sup>, *д.т.н., профессор, директор по науке и новой технике (tree-89@mail.ru)*

<sup>1</sup> **ЗАО ПИИ СИТ «НЕФТЕГАЗСТРОЙИЗОЛЯЦИЯ»**  
(04136, Украина, Киев, ул. Маршала Гречко, 14)

**Аннотация.** Приведены расчеты режимов нагрева и плавления термомассивной стальной плиты в форме брикета из стали ШХ15 с использованием расчетных выражений, полученных на базе метода эквивалентных источников. Рассмотрены три случая при реализации сквозной технологии «нагрев–плавление» при изменении теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости теплообрабатываемой стали. Для анализа погрешности продолжительности плавления брикета теплофизические характеристики задавали при начальной температуре, конечной температуре (плавления) и средней температуре брикета в процессе нагрева и плавления. Анализ результатов показал необходимость учета изменения теплофизических характеристик брикета от температуры. В расчетных соотношениях также варьировался коэффициент внешнего теплообмена. Получена графическая зависимость динамики плавления брикета в зависимости от интенсивности процесса плавления и реального размера брикета.

**Ключевые слова:** стальной легируемый брикет, продолжительность нагрева и плавления, теплофизические свойства, коэффициент теплообмена, дуговая сталеплавильная печь.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-7-531-537

Современные сталеплавильные технологии подразумевают в том числе применение принципиально новых материалов в ходе сталелитейного процесса. При этом к самим материалам сегодня предъявляются повышенные технологические требования, обусловленные не только исключительно высокими показателями качества стали на выпуске из сталеплавильного агрегата, но также и экономией энергетических и материальных ресурсов [1 – 4]. Здесь, по мнению авторов, теплотехническая сторона вопроса имеет существенное значение в связи с тем, что скорость расплавления основного технологического сырья (лом, переделный чугун и др.) и легирующих предопределяет основные аспекты технологии: расход вдуваемого кислорода, время выдержки металла под током, добавку извести и науглероживателя, наведение шлака, количество оставшегося жидкого металла и шлака и др.

Вопросам исследования кинетики плавления различных шихтовых материалов в теории и технологии сталеплавильного процесса всегда уделялось повышенное внимание. Многие известные ученые теплофизики и технологи уделяют значительное внимание экспериментальным и, особенно, теоретическим методам исследования режимов нагрева–плавления материалов в ходе плавки. Для этой цели эффективно используются различные (аналитические и численные) методы расчетов процесса теплопроводности [5 – 12] с нелинейностью I, II и III рода [13 – 15]. Метод эквивалентных

источников (МЭИ), безусловно, проявил себя как эффективный математический метод решения разнообразных задач теории внутреннего теплообмена, в том числе сложных задач со всей совокупностью нелинейных факторов [15].

Следует отметить, что большинство исследователей, занимающихся вопросами интенсификации металлургических процессов плавки, решают в первую очередь технологические задачи, связанные с применением новых материалов в ходе организации процесса производства стали. В отмеченных авторами публикациях [5, 8 – 11] первостепенное значение уделяется анализу теплотехнологических режимов при использовании ферросплавов, расплавлении кусков металлолома, либо применению новых легирующих для улучшения показателей качества стали после завершения режима плавки.

В данном конкретном случае решается несколько иная задача: следует доказать возможность применения брикетов, произведенных из стальной стружки, в электросталеплавильном процессе, т. е. создать в конкретном случае сквозную ресурсосберегающую технологию.

Например в машиностроительном комплексе Республики Беларусь ежегодно образуется свыше 200 тыс. т отходов металла в виде стружки. В частности, в условиях шарикоподшипникового производства образуется в совокупности около 10,0 тыс. т подобных отходов,

которые целесообразно эффективно использовать с целью создания именно материалоеффективных технологий в сталеплавильном производстве. Изготовление брикета (в конкретном случае) с плотностью на уровне 5000 – 5500 кг/м<sup>3</sup> не представляется достаточно сложной технологической операцией, хотя в этом случае существенным балластом в ходе плавки могут стать шлак и примеси (в виде земляных примесей, отработанного масла и др.). И, наоборот, именно решение задачи плавления этого брикета представляет собой наиболее сложную задачу с точки зрения теплофизики процесса «нагрев–плавление».

В работе [16] авторами 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 металлургических 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 настоящей работе приведены результаты расчетного анализа продолжительности плавления брикетов из стали ШХ15 в дуговой сталеплавильной печи.

Получение брикетов высокого качества возможно практически в условиях только специализированного машиностроительного производства. Так, в частности, брикетированную стружку из чугуна и стали высокого качества представляется возможным произвести в условиях предприятий, как правило, специализирующихся на строго определенном марочном сортаменте металлов. К таким предприятиям-производствам относятся: чугуно-литейные заводы, предприятия авто-тракторостроения и предприятия по изготовлению подшипниковой продукции.

В Республике Беларусь имеется технологический ресурс для эффективного и продуктивного использования имеющегося потенциала при создании ресурсосберегающих технологий получения стальных (из стали ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ) и чугунных брикетов вследствие значительных отходов при механической обработке. В конкретном случае представляется возможным реализовать, по сути, безотходный сквозной технологический процесс для отдельных марок стали и чугуна.

Используя данные работы [16], а также фактические производственные данные изготовленного брикета, для расчета продолжительности процесса «прогрев–нагрев–плавление» брикетов (без шлама и со шламом) из стали ШХ15 приняли 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  $\alpha_k$  варьировали от 0,5 до 15 кВт/(м<sup>2</sup>·К).

Практический интерес при моделировании теплофизического процесса «нагрев–плавление» представляет, на взгляд авторов, изучение влияния переменной теплофизических характеристик (ТФХ) от температуры на продолжительность плавления. Подобные исследования были выполнены ранее [17, 18]. При этом показано, что нелинейность I рода существенно влияет на динамику процесса, в частности, на технологию нагрева [17] и уровень термических напряжений в телах простой формы (пластина и цилиндр) [18]. Необходимо отметить, что в работах [17, 18] решение тепловой задачи также приведено для схемы термического слоя, а алгоритм расчета построен в соответствии с теорией метода эквивалентных источников (МЭИ).

Теплофизические характеристики, согласно имеющимся справочным данным [19], при использовании линейной аппроксимации определяли функциями:

$$\left. \begin{aligned} \lambda(T) &= 43,5 - 1,53 \cdot 10^{-2}(T - T_0), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \\ \varepsilon_{\lambda} &= -0,51; \\ c_p(T) &= 527,6 + 0,127(T - T_0), \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_v(T) &= 4157 + 0,786(T - T_0), \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \\ \varepsilon_c &= 0,274; \\ \rho(T) &= 7879 - 0,324(T - T_0), \text{ кг/м}^3; \\ \rho_b(T) &= 6192 - 0,255(T - T_0), \text{ кг/м}^3; \\ \rho_{b/sh}(T) &= 5819 - 0,239(T - T_0), \text{ кг/м}^3; \\ c_b^V(T) &= 3267 + 0,618(T - T_0), \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \\ \varepsilon_c &= 0,274; \\ c_{b/sh}^V(T) &= 3070 + 0,580(T - T_0), \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \\ \varepsilon_c &= 0,274 \end{aligned} \right\}, (1)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость;  $c_v$  – удельная изохорная теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $b$  – брикет;  $b/sh$  – брикет без шлама;  $\varepsilon_{\lambda}, \varepsilon_c$  – безразмерные величины, характеризующие переменность теплопроводности и теплоемкости от температуры (в линейной зависимости).

Продолжительность нагрева определяли выражением

$$\tau_0 = \frac{1 - 0,15(\varepsilon_{\lambda} - \varepsilon_c) \text{Bi} K_T}{6}, (2)$$

где  $\tau$  – безразмерное время;  $\text{Bi}$  – критерий Био;  $K_T$  – безразмерный параметр ( $K_T = \frac{T_0 - T_{\phi}}{T_{\phi} - T_c}$ , где  $T_0$  – начальная температура;  $T_c$  – температура внешней среды;  $T_{\phi}$  – температура плавления).

При  $\varepsilon_c > 0$   $\tau_0$  возрастает, т. е. скорость распространения тепла (см. рисунок [16]) уменьшается. При  $\varepsilon_1 > 0$  имеет место обратная картина: скорость продвижения теплового возмущения внутри тела возрастает, а  $\tau_0$

уменьшается. Учитывая это обстоятельство и тот факт, что взаимное влияние обеих нелинейностей  $\varepsilon_c$  и  $\varepsilon_\lambda$  может оказать малосущественное влияние, для быстропротекающего периода  $\tau_0$  появляется возможность в инерционном периоде пренебречь переменностью ТФХ.

В данном случае при  $\varepsilon_\lambda = \varepsilon_c = 0$

$$\tau_0 = \frac{1}{6}; \theta_n^0 = \frac{\text{Bi}K_T}{2}; \Delta\tau_\phi^0 = \frac{2 - \text{Bi}_0K_T}{\text{Bi}_0K_T};$$

$$\Delta\tau_\phi = \frac{\text{Bi}_0 + 3\text{Ko}^0}{\text{Bi}_0K_T}; \tau_\phi = \frac{1 + \text{Ko}^0}{\text{Bi}_0K_T}, \quad (3)$$

где  $\theta$  – безразмерная температура;  $n$  – поверхность;  $\phi$  – фактическое значение;  $\text{Ko}$  – критерий Косовича.

Для уравнения (12) [16] при  $\varepsilon_\lambda > 0$  очевидно

$$\left. \begin{aligned} \theta_n^0 &= \frac{1}{\varepsilon'_\lambda} \left( \sqrt{1 + \varepsilon'_\lambda \text{Bi}K_T} - 1 \right); \\ \theta_n^0 &= \frac{1}{|\varepsilon''_\lambda|} \left( 1 - \sqrt{1 - |\varepsilon''_\lambda| \text{Bi}K_T} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

и соответствует значению температуры к моменту окончания инерционного этапа (см. рисунок [16]).

Возможны варианты, когда используются значения теплофизических характеристик (1), соответствующие начальной ( $T_0$ ), конечной ( $T_\phi$ ) или средней [ $\bar{T} = (T_0 + T_\phi)/2$ ] температуре.

В дополнение к ранее принятым исходным данным для стали ШХ15 [19] ТФХ определялись функциями линейного вида

$$\left. \begin{aligned} \lambda(T) &= \lambda_0(1 + \varepsilon_\lambda\theta); \quad \varepsilon_\lambda = \frac{\delta_\lambda}{\lambda_0}(T_\phi - T_0); \\ c(T) &= c_0(1 + \varepsilon_c\theta); \quad \varepsilon_c = \frac{\delta_c}{c_0}(T_\phi - T_0) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $\delta_\lambda, \delta_c$  – тангенсы угла наклона прямых при линейных зависимостях  $\lambda$  и  $c$  от температуры.

Исходные данные для ТФХ приведены в табл. 1. Результаты расчетов для трех вариантов значений темпе-

ратур и соответствующие им значения ТФХ приведены в табл. 2 – 4.

На последующем этапе выполнены расчеты продолжительности  $\tau_\phi$  плавления по формулам (7), (8) [16], учитывающим непрерывное изменение теплофизических характеристик. При этом заметим, что параметры нелинейности I рода  $\varepsilon_\lambda$  и  $\varepsilon_c$  одинаковы для брикетов без шлама и со шламом ( $\varepsilon_\lambda = -0,51, \varepsilon_c = 0,274$ ). Все входящие в формулы (7), (8) [16] критерии и числа соответствуют, согласно постановке исходной задачи, начальной температуре  $T_0 = 293 \text{ K} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\theta_n^0 = \frac{1 - \sqrt{1 - 0,51\text{Bi}_0K_T}}{0,51}; \quad (6)$$

$$\tau_0 = \frac{1 + 0,15(0,51 + 0,274)\text{Bi}_0K_T}{6}; \quad (7)$$

$$\Delta\tau_\phi^0 = \frac{1 - \theta_n^0}{\text{Bi}_0K_T}; \quad (8)$$

$$\delta_{\phi 1} = 1 + 0,274 \frac{1 + \theta_n^0}{2}; \quad (9)$$

$$\delta_{\phi 2} = \frac{(0,51 + 0,274)}{3(1 - 0,51)} \frac{\text{Bi}_0K_T}{1 - 0,51\theta_n^0} = 0,5333 \frac{\text{Bi}_0K_T}{1 - 0,51\theta_n^0}; \quad (10)$$

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

$$= 0,0713 \left[ 1 - 0,251(1 + \theta_n^0) \right] \delta_{\phi 2}^2; \quad (11)$$

$$\Delta\tau_\phi^0 = \Delta\tau_\phi^0 (\delta_{\phi 1} - \delta_{\phi 2} + \delta_{\phi 3}); \quad (12)$$

$$\Delta\tau_\phi = \frac{1}{3} \cdot \frac{1,274}{1 - 0,51} + \frac{0,354}{\text{Bi}_0K_T}; \quad (13)$$

$$\tau_\phi = \tau_0 + \Delta\tau_\phi^0 + \Delta\tau_\phi. \quad (14)$$

Анализ результатов расчетов этих величин показал, что в формулах (8) [16], (12) слагаемыми  $\delta_{\phi 3}$  можно пренебречь, так как они начинают проявлять себя лишь при больших значениях  $\alpha_\kappa$  и  $h$ .

Таблица 1

**Значения ТФХ, соответствующие характерным температурам**

Table 1. Values of TPC corresponding to the characteristic temperatures

T, °C	ШХ15		$\gamma, \text{кг/м}^3$			C, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)			$a \cdot 10^2, \text{м}^2/\text{ч}$		
	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{К}$	$c_p, \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$	ШХ15	брикет	брикет со шламом	ШХ15	брикет	брикет со шламом	ШХ15	брикет	брикет со шламом
$T_0 = 20$			7872	6187	5814	4173	3280	3082	3,73	4,72	5,05
$T_\phi = 1470$	21,0	714	7403	5818	5467	5284	4163	3922	1,25	1,59	1,69
$\bar{T} = 745$	32,1	622	7638	6003	5641	4750	3727	3502	2,49	3,17	3,37

Таблица 2

**Продолжительность ( $\tau_{\phi}$ , мин) плавления брикетов из стали ШХ15 при начальных значениях теплофизических характеристик**

*Table 2. Duration ( $\tau_{\phi}$ , min) of melting of ShKh15 steel briquettes with initial values of thermal characteristics*

Вид брикетов	$h \cdot 10^3$ , м	$\alpha_k$ , кВт/(м <sup>3</sup> ·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 3

**Продолжительность ( $\tau_{\phi}$ , мин) плавления брикетов из стали ШХ15 при значениях теплофизических характеристик, соответствующих  $T_{\phi}$**

*Table 3. Duration ( $\tau_{\phi}$ , min) of melting of ShKh15 steel briquettes at values of thermal characteristics corresponding to  $T_{\phi}$*

Вид брикетов	$h \cdot 10^3$ , м	$\alpha_k$ , кВт/(м <sup>3</sup> ·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 4

**Продолжительность ( $\tau_{\phi}$ , мин) плавления брикетов из стали ШХ15 при значениях теплофизических характеристик, соответствующих  $\bar{T}$**

*Table 4. Duration ( $\tau_{\phi}$ , min) of melting of ShKh15 steel briquettes at values of thermal characteristics corresponding to  $\bar{T}$*

Вид брикетов	$h \cdot 10^3$ , м	$\alpha_k$ , кВт/(м <sup>3</sup> ·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 $\bar{a} = 3,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{ч}$	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

В табл. 5 приведены результаты расчетов полного времени  $\tau_{\phi}$  протекания процесса «прогрев–нагрев–плавление» брикетов стали из ШХ15 без шлама и со шламом при переменных теплофизических харак-

теристиках. На рисунке показана качественная картина изменения продолжительности плавления брикета стали из ШХ15 (без шлама) от интенсивности теплообмена  $\alpha_k$ , отражающая зависимость: нелинейную по

Продолжительность ( $\tau_\phi$ , мин) плавления брикетов стали ШХ15 с учетом термической чувствительности материала

Table 5. Duration ( $\tau_\phi$ , min) of melting of ShKh15 steel briquettes according to the heat sensitivity of the material

Вид брикетов	$h \cdot 10^3$ , м	$\alpha_k$ , кВт/(м <sup>3</sup> ·К)					
		0,5	1,0	2,5	5,0	10,0	15,0
Без шлама $a_0 = 4,72$ м <sup>2</sup> /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 $a_0 = 5,05$ м <sup>2</sup> /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

коэффициентам теплоотдачи  $\alpha_k$  и линейную по размерам брикета  $h$  и демонстрирующая продолжительность процесса с учетом термической чувствительности материала стальных брикетов.

Анализ сопоставления приведенных результатов (см. табл. 5) с данными, полученными с допущением о постоянстве теплофизических характеристик при заданной температуре (см. табл. 2 – 4) показывает, что результаты расчета продолжительности процесса «прогрев – нагрев – плавление» существенно зависят от того, при каких температурах величины теплофизических свойств были приняты за расчетные.

Приведенные расчетные данные (см. табл. 2 – 5) показали следующее: если принять наиболее близкие к истинным результаты расчета с переменными ТФХ в интервале температур, то по сравнению с ними (см. табл. 5) несколько упрощенные расчеты при  $\epsilon_\lambda = 0$ ,  $\epsilon_c = 0$  (см. табл. 2 – 4) показали следующие отклонения (погрешности) в определении реального времени плавления брикета  $\tau_\phi$  ( $t_\phi$ ) при ТФХ, соответствующих значениям температур:

- 1)  $T = T_0$ , очевидно уменьшение времени процесса на 10 – 12 %;
- 2)  $T = T_\phi$ , противоположное явление – увеличение продолжительности плавления на 18 – 22 %;
- 3)  $T = \bar{T}$ , наблюдается занижение времени на 3 – 4 %.

Эта же закономерность наблюдается при величине параметра  $\alpha_k \leq 5$  кВт/(м<sup>2</sup>·К). При интенсификации процесса плавления в жидкой ванне за счет увеличения  $\alpha_k$ , например до 10 кВт/(м<sup>2</sup>·К), наблюдается следующая картина величины отклонений: в первом и в третьем случаях возрастают, а во втором – заметно снижаются.

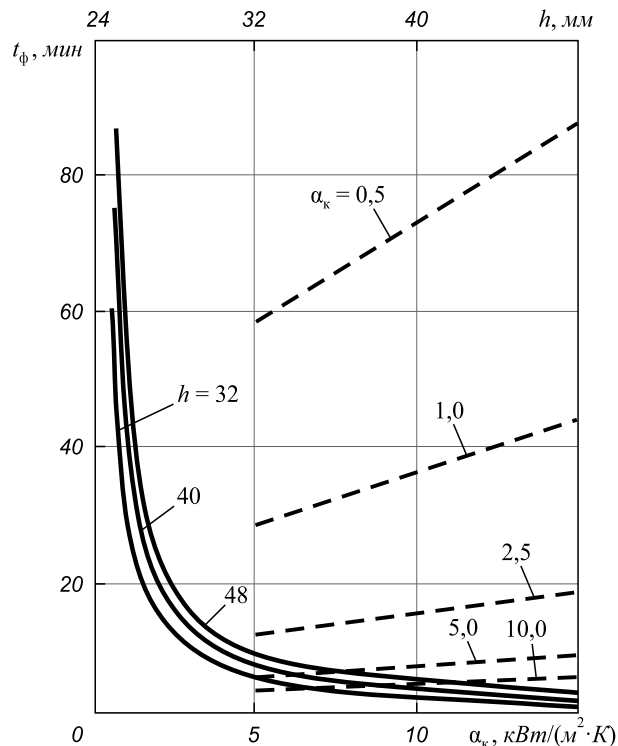
На рисунке представлена графическая интерпретация динамики плавления брикета из стали ШХ15 (без шлама) в зависимости от интенсивности процесса плавления  $\alpha_k$  и реального (расчетного) размера  $h$ .

Графики, приведенные на рисунке, показывают, что при незначительной интенсивности теплообмена в общем времени  $t_\phi$  значительный временной период отводится на предварительный нагрев, а при интенсификации режима плавления (увеличении величины коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$ ) наступает активная фаза режима плавления.

Выводы. Разработан аналитический метод расчета теплотехнологического режима «нагрев – плавление» брикетированной стальной пластины в жидком расплаве.

Метод базируется на решении задачи типа Стефана для инерционного и регулярного этапов теплообмена внутри материала.

Метод базируется на решении задачи типа Стефана для инерционного и регулярного этапов теплообмена внутри материала.



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

ShKh15 steel briquette (no slime) melting time versus heat exchange intensity, ( $\alpha_k$ ), and briquette size, ( $h$ ), taking regard to the variability of thermophysical characteristics



Целесообразность применения рассмотренного способа расчета для различных металлургических технологий плавления основывается на переменности ТФХ материала пластины от температуры. Приведен пример расчета режима плавления легированного брикета из стали ШХ-15 в сталеплавильной ванне с учетом интенсивности режима плавки.

Несмотря на существенную (двойную) нелинейность сформулированной задачи и сложность расчетных соотношений, полученных в явном виде, решение исходной задачи вполне эффективно можно использовать для выполнения теплотехнических расчетов режимов плавления в жидких расплавах.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глинок М.А. Тепловая работа сталеплавильных ванн. – М.: Металлургия, 1970. – 407 с.
2. Тимошпольский В.И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 256 с.
3. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: Мир, 2003. – 527 с.
4. Рябов А.В., Чуманов И.В., Шишимиров М.В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах. – М.: Теплотехник, 2007. – 192 с.
5. Гольдфарб Э.М., Шерстов Б.И. Тепло- и массообмен при плавлении лома в кислородном конвертере // Инженерно-физический журнал. 1970. Т. 18. № 3. С. 492 – 498.
6. Гольдфарб Э.М., Шерстов Б.И. Применение неявной конечно-разностной схемы для исследования плавления лома в условиях кислородного конвертера // Инженерно-физический журнал. 1971. Т. 19. № 4. С. 17 – 19.
7. Крупенников С.А., Филимонов Ю.П. О диффузионном плавлении стали в жидком чугуне // Изв. вуз. Черная металлургия. 1979. № 1. С. 140 – 142.
8. Крупенников С.А., Филимонов Ю.П. К вопросу о математическом моделировании процесса нагрева стали в жидком чугуне // Изв. вуз. Черная металлургия. 1983. № 3. С. 108 – 111.
9. Павлюченков И.А., Кривко Е.М., Чуб П.И. Кинетика плавления коржей шлака силикомарганца в конвертере // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 7. С. 11 – 13.
10. Носков А.С., Жучков В.И., Завьялов А.Л. Плавление ферросплавов в железоуглеродистом расплаве // Изв. вуз. Черная металлургия. 1985. № 10. С. 32 – 37.
11. Пантелеева Н.В., Филимонов Ю.П. Нагрев и плавление легкоплавких ферросплавов в жидкой стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 11. С. 156 – 157.
12. Румянцев В.Д., Ольшанский В.М. Теплотехника: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.И. Губинского. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 325 с.
13. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 237 с.
14. Теплотехника металлургического производства. Т. 1. Теоретические основы: Учеб. пособие для вузов. / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др. / Под ред. В.А. Кривандина. – М.: МИСиС, 2002. – 608 с.
15. Тимошпольский В.И., Постольник Ю.С., Андрианов Н.В. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии. – Минск: Бел. наука, 2005. – 560 с.
16. Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И. Расчеты плавления стальных плоских брикетов в жидкой ванне сталеплавильного агрегата. Сообщение 1. Математическая постановка задачи и аналитическое решение // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 6. С. 455 – 459.
17. Тимошпольский В.И., Трусова И.А. К расчету нагрева массивного металла в пламенных печах // Изв. вуз. Энергетика. 1985. № 1. С. 103 – 106.
18. Постольник Ю.С. Термоупругие напряжения в металле с зависящими от температуры свойствами при лучистом нагреве // Изв. вуз. Черная металлургия. 1983. № 6. С. 111 – 114.
19. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник. / Под ред. Б.Е. Неймарк. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 239 с.

Поступила 21 января 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 7, pp. 531–537.

## THE CALCULATIONS OF STEEL FLAT BRIQUETTES MELTING IN LIQUID BATH OF A STEELMAKING UNIT. REPORT 2. CALCULATIONS OF HEATING AND MELTING MODES OF AN ALLOYED BRIQUETTE

**Postol'nik Yu.S.**, *Dr. Sci. (Eng.), Professor*  
**Timoshpol'skii V.I.**<sup>1</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of science and new equipment* (tree-89@mail.ru)

<sup>1</sup> CJSC PII SIT “NEFTEGAZSTROIIZOLYATSIYA” (14, Marshala Grechko str., Kiev, 04136, Ukraine)

**Abstract.** The calculations of heating and cooling modes for a thermomassive slab, made of ShKh15 steel in the form of a briquette, are presented, using predictive expressions as obtained following the method of equivalent sources. Three cases of implementation of a “through” (continuous) “heating–melting” operation practices are covered, with concurrent variation of thermal and physical properties (TPP) of the thermally treated steel, namely, – those of the thermal conductivity coefficient and heat capacity per unit volume. To analyze briquette melt-down time errors, thermophysical properties have been specified at the initial temperature, final temperature (melting), and at the briquette average temperature in the course of heating and melting. The results indicate the need

for taking into account changes in thermophysical properties of briquettes due to temperature. In computational relations, the external heat exchange,  $\alpha_k$ , has been varied. A graph of the dynamics of briquette melting  $v_s$ , melting intensity ( $\alpha_k$ ) and the briquette actual size has been plotted.

**Keywords:** steel alloyed briquette, duration of heating and melting, thermal properties, coefficient of heat exchange, steelmaking arc furnace.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-7-531-537

### REFERENCES

1. Glinkov M.A. *Teplovaya rabota staleplavil'nykh vann* [Heat work of steel-making baths]. Moscow: Metallurgiya, 1970. 407 p. (In Russ.).
2. Timoshpol'skii V.I. *Teplotekhnologicheskie osnovy metallurgicheskikh protsessov i agregatov vysshego tekhnicheskogo urovnya* [Thermal and technological basics of metallurgical processes and aggregates of the highest technical level]. Minsk: Navuka i tekhnika, 1995. 256 p. (In Russ.).

3. Kudrin V.A. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali: Uchebnik dlya VUZov* [Theory and technology of steel production]. Moscow: Mir, 2003. 527 p. (In Russ.).
4. Ryabov A.V., Chumanov I.V., Shishimirov M.V. *Sovremennye sposoby vyplavki stali v dugovykh pechakh* [Modern methods of steel making in arc furnaces]. Moscow: Teplotekhnika, 2007. 192 p. (In Russ.).
5. Gol'dfarb E.M., Sherstov B.I. Heat and mass exchange at bar melting in an oxygen converter. *IFZh*. 1970. Vol. 18, no. 3, pp. 492–498. (In Russ.).
6. Gol'dfarb E.M., Sherstov B.I. Application of an implicit finite-difference scheme to study bar melting in an oxygen converter. *IFZh*. 1971. Vol. 19, no. 4, pp. 17–19. (In Russ.).
7. Krupennikov S.A., Filimonov Yu.P. On diffusion steel melting in liquid cast iron. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1979, no. 1, pp. 140–142. (In Russ.).
8. Krupennikov S.A., Filimonov Yu.P. The problem of mathematical modeling of a steel heating process in liquid cast iron. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1983, no. 3, pp. 108–111. (In Russ.).
9. Pavlyuchenkov I.A., Krivko E.M., Chub P.I. Kinetics of manganese-silicon clinker cakes melting in a converter. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987, no. 7, pp. 11–13. (In Russ.).
10. Noskov A.S., Zhuchkov V.I., Zav'yalov A.L. Ferroalloy melting in iron-carbon melt. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1985, no. 10, pp. 32–37. (In Russ.).
11. Panteleeva N.V., Filimonov Yu.P. Heating and melting of fusible ferroalloys in liquid steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 11, pp. 156–157. (In Russ.).
12. Rumyantsev V.D., Ol'shanskii V.M. *Teplotekhnika: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Thermal engineering: Textbook for universities]. Gubinskii V.I. ed. Dnepropetrovsk: Porogi, 2002. 325 p. (In Russ.).
13. Kozdoba L.A. *Metody resheniya nelineinykh zadach teploprovodnosti* [Methods of solving the nonlinear problems of heat conductivity]. Moscow: Nauka, 1975. 237 p. (In Russ.).
14. Krivandin V.A., Arutyunov V.A., Belousov V.V., Krupennikov S.A., Sborshchikov G.S., Kobakhidze V.V., Egorov A.V., Filimonov Yu.P. *Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva* [Thermal engineering in metallurgical production]. Krivandin V.A. ed. Vol. 1. *Teoreticheskie osnovy: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Theoretical basics: Textbook for universities]. Moscow: MISiS, 2002. 608 p. (In Russ.).
15. Timoshpol'skii V.I., Postol'nik Yu.S., Andrianov D.N. *Teoreticheskie osnovy teplofiziki i termomekhaniki v metallurgii* [Theoretical foundations of thermal physics and thermal mechanics in metallurgy]. Minsk: Bel. nauka. 2005. 560 p. (In Russ.).
16. Postol'nik Yu.S., Timoshpol'skii V.I. The calculations of steel flat briquettes melting in liquid bath of a steelmaking unit. Report 1. Mathematical formulation of the problem and analytical solution. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, Vol. 58, no. 6, pp. 455–459. (In Russ.).
17. Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A. To the issue of calculations of bulk metal heating in flame furnaces. *Izvestiya vuzov. Energetika*. 1985, no. 1, pp. 103–106. (In Russ.).
18. Postol'nik Yu.S. Thermoelastic stresses in metal with properties depending on temperature at radiant heating. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1983, no. 6, pp. 111–114. (In Russ.).
19. *Fizicheskie svoystva stali i splavov, primenyaemykh v energetike. Spravochnik* [The physical properties of steels and alloys used in the energy sector: Manual]. Neimark B.E. ed. Moscow–Leningrad: Energiya, 1967. 239 p. (In Russ.).

Received January 21, 2015