

РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.162.275.2:536.7

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ
В ПРОЦЕССЕ ИХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Юрьев Б.П., к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики
в металлургии (yurev-b@mail.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Проведено изучение теплофизических характеристик натуральных и синтетических доменных шлаков. Определена зависимость изменения энтальпии и теплоемкости шлаков в интервале температур от 293 до 1273 К с использованием метода количественного термического анализа. Усовершенствована методика определения коэффициентов температуропроводности материалов по термограмме нагрева образца цилиндрической формы. По этой методике определены коэффициенты температуропроводности доменных шлаков. С использованием полученных коэффициентов температуропроводности и предварительно определенных значений теплоемкости найдена зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры и содержания в шлаках оксида титана. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации режимных параметров работы существующих установок по переработке доменных шлаков, при проектировании новых установок, а также при определении оптимальных скоростей нагрева и охлаждения в процессе термической обработки литых шлаковых изделий.

Ключевые слова: теплофизические свойства, доменные шлаки, энтальпия, теплоемкость, коэффициенты температуро- и теплопроводности, оксид титана, температура, параметры, оптимизация, режимы, содержание.

Для инженерных расчетов, связанных с конструированием установок для переработки доменных шлаков и выбора оптимальных тепловых режимов их работы необходимо знание теплофизических характеристик (теплоемкости, коэффициентов температуро- и теплопроводности) и изменения их в широком интервале температур. Знание этих характеристик необходимо и для расчета оптимальных скоростей нагрева и охлаждения при термической обработке литых шлаковых изделий [1]. В справочной литературе приводятся в основном данные о наиболее простых по составу и наиболее часто встречающихся в металлургической технике материалах [2, 3], но мало данных о свойствах шлаков металлургического производства.

В работе сделана попытка определения теплофизических характеристик некоторых синтетических и натуральных шлаков, в том числе и титаносодержащих, химический состав которых приведен в табл. 1.

Изменение энтальпии ΔH при нагревании исследуемых шлаков определяли методом количественного термического анализа, получившего распространение в исследованиях, связанных с определением теплофизических свойств металлургического сырья [4]. Сущность метода заключается в том, что к эталону или исследуемому образцу подводится в единицу времени постоянное количество теплоты. В ходе опыта измеряли температуру образца и перепад ее в стенке защитного стакана (перепад характеризует тепловой поток, поступающий к образцу через стенки стакана). Установку тарировали с помощью эталонов (глинозем марки ч.д.а. и металлический электролитический никель). Условный к.п.д. установки был повышен (по сравне-

нию со значениями, приведенными в работе [4]) за счет снижения массы защитного стакана, применения ультралегковесного пеношамота и увеличения массы исследуемых образцов.

Точность тарировочных опытов проверяли по контрольным веществам (ZnO , кварц, $CaCO_3$) с известными величинами ΔH при нагревании в данном температурном интервале. Установлено, что полученные значения для эталонов удовлетворительно согласуются с литературными и расчетными данными, полученными по правилу аддитивности из энтальпий отдельных оксидов (табл. 2). Расхождение не превышало 5%. Результаты исследований изменения энтальпии ΔH , кДж/кг и средней теплоемкости C_p , кДж/(кг·К) натуральных доменных и синтетических шлаков с различным содержанием оксида титана TiO_2 (см. табл. 1) были обработаны методом наименьших квадратов и аппроксимированы уравнениями вида

$$\Delta H_T = K_1 + K_2(T - 373) + K_3(T - 373)^2 + K_4(T - 373)^3; \quad (1)$$

$$C_p = K_2 + K_3(T - 373) + K_4(T - 373)^2. \quad (2)$$

Значения коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 и K_4 приведены в табл. 3.

В данной работе не ставилась задача подробного изложения методики определения коэффициентов температуропроводности, разработанной авторами [5–6]. Поэтому ниже приводятся только краткие сведения о методе, который является дальнейшим развитием и совершенствованием метода измерения теплофизических свойств материалов, предложенного в работе [7].

Таблица 1

Химический состав исследованных шлаков

Вид шлака	Содержание, % (по массе)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	FeO	S	V ₂ O ₅
Доменный шлак передельного чугуна Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК)	35,6	15,4	40,0	5,9	0,90	–	0,40	1,68	–
Доменный шлак передельного чугуна Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК)	37,3	16,8	38,0	5,8	0,70	0,8	0,91	1,12	–
Доменный шлак ванадиевого чугуна НТМК	30,9	16,0	31,9	10,7	0,43	8,6	0,68	0,54	0,16
Синтетические шлаки:									
№ 1	34,9	16,6	36,4	12,1	–	–	–	–	–
№ 2	33,7	16,2	35,7	11,3	–	3,1	–	–	–
№ 3	32,9	16,1	34,0	10,5	–	6,5	–	–	–
№ 4	31,6	15,8	33,4	10,6	–	8,7	–	–	–
№ 5	29,2	16,0	32,0	9,6	–	13,3	–	–	–
№ 6	29,3	15,5	30,4	9,8	–	15,0	–	–	–

Таблица 2

Изменение энтальпии при нагревании контрольных образцов, кДж/кг

T, К	ZnO	Кварц	CaCO ₃	Доменный шлак	
				опыт	расчет
373	48,4	77,4	90,3	76,6	82,0
	49,5	78,5	89,4	77,8	80,3
473	107,0	161,0	191,0	168,5	171,0
	108,2	159,7	189,5	167,5	169,3
573	162,0	263,5	292,0	255,5	266,0
	163,8	265,4	289,0	263,5	257,5
673	227,5	378,5	402,0	360,5	366,5
	227,5	380,0	397,0	360,0	364,0
773	291,0	508,0	516,0	453,0	469,0
	291,5	500,5	515,0	460,5	466,0
873	351,5	627,0	627,0	557,5	574,0
	354,5	630,0	634,0	560,5	573,0
973	414,0	747,5	–	649,0	683,0
	420,0	746,0	–	652,0	675,4
1073	472,1	870,0	–	768,5	793,0
	483,0	863,4	–	762,0	785,0
1173	525,0	990,0	–	887,5	903,0
	530,4	983,5	–	886,5	904,0
1273	591,1	1132,0	–	1013,0	1015,0
	602,7	1127,9	–	1015,0	1011,2

Примечание. В числителе приводятся данные автора статьи, в знаменателе – авторов работы [4] для ZnO, кварца, CaCO₃ и доменного шлака следующего состава, % (по массе): 41,70 SiO₂; 14,40 Al₂O₃; 39,00 CaO; 1,40 MgO; 0,76 FeO; 1,60 S.

Сущность метода состоит в том, что действительная кривая изменения температуры исследуемого образца аппроксимируется ломаной линией с постоянной ско-

ростью изменения температуры на отдельных участках нагрева (охлаждения). При достаточно большом числе участков методическая ошибка от такой аппроксимации ничтожно мала.

Начальное распределение температуры в образцах цилиндрической формы, имеющих радиус *R*, предлагается аппроксимировать параболой

$$T(r, \tau) = T(R, 0) - \Delta T_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right),$$

где *T(r, τ)* – температура в точке на расстоянии *r* от оси цилиндра в момент времени *τ* (для начала участка нагрева с постоянной скоростью принято *τ* = 0); $\Delta T_0 = T(R, 0) - T(0, 0)$ – начальная разность температур на поверхности и на оси цилиндра.

При таком допущении распределение температуры в бесконечном цилиндре в конце участка нагрева с постоянной скоростью описывается выражением [7]:

$$T(r, \tau_i) = T(R, \tau_i) - \frac{b_i R^2}{4a_i} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) - \left(\frac{b_i R^2}{a_i} - 4\Delta T_{0,i-1} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right)}{\mu_n^3 J_1(\mu_n)} \times \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a_i \Delta \tau_i}{R^2} \right), \quad (3)$$

где $b_i = \partial T(R, \tau) / \partial \tau$ – скорость изменения температуры поверхности на *i*-м участке нагрева, К/с; *a_i* – коэффициент температуропроводности материала образца на *i*-м участке, м²/с; $\Delta T_{0,i}$ – разность температур на поверхности и на оси образца в конце *i*-го участка нагрева, К; *J₀*, *J₁* – функции Бесселя I рода нулевого и первого по-

Значения коэффициентов K_1, K_2, K_3, K_4 в уравнениях (1) и (2) для шлаков доменной плавки и синтетических шлаков

Вид шлака	K_1	K_2	K_3	K_4
Доменный шлак передельного чугуна НЛМК	75	0,85	$15,6 \cdot 10^{-6}$	$19,5 \cdot 10^{-8}$
Доменный шлак передельного чугуна НТМК	73	0,94	$0,81 \cdot 10^{-4}$	$33,6 \cdot 10^{-9}$
Доменный шлак ванадиевого чугуна НТМК	70	1,00	$28,0 \cdot 10^{-6}$	$54,5 \cdot 10^{-9}$
Синтетические шлаки:				
№ 1	110	1,40	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$
№ 2	100	1,30	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$41,0 \cdot 10^{-9}$
№ 3	85	1,10	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$31,4 \cdot 10^{-8}$
№ 4	91	1,16	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$41,5 \cdot 10^{-9}$
№ 5	90	1,15	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$68,0 \cdot 10^{-9}$
№ 6	89	1,13	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$59,0 \cdot 10^{-9}$

рядков; τ_i – время, соответствующее окончанию i -го участка нагрева, с; $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}$; μ_n – корни уравнения $J_0(\mu_n) = 0$.

Выражение (3) с ошибкой менее 0,7 % выполняется и для образцов конечной длины L , если $L \geq 6R$ [8].

Определение коэффициента температуропроводности предлагается производить путем графического решения уравнения (3), в котором все величины, кроме a_i , находятся из опыта (по термограммам для двух избранных точек образца). Обычно в опытах по определению коэффициента температуропроводности измеряются: температура в центре образца $T(0, \tau_i)$, температура на поверхности образца $T(R, \tau_i)$, время окончания i -го интервала нагрева τ_i . Величины $\Delta T_{0,i}$, $\Delta\tau_i$, b_i рассчитываются. Затем решается уравнение (3) относительно a_i .

Рассмотренный метод имеет серьезный методический недостаток: начальное распределение температур в образце предполагается таким, какое бывает при регулярном режиме, хотя в общем случае это не так. Таким образом, в случае сильно нерегулярных (нестационарных) режимов, метод может привести к значительным ошибкам.

В данной работе этот метод использован в более точном варианте. Кривая нагрева разбивается на ряд следующих друг за другом участков со скоростями нагрева b_1, b_2, \dots, b_m . Распределение температур в бесконечном цилиндре в конце m -го участка нагрева при этом описывается выражением [5]

$$T(r, \tau_m) = T(R, \tau_m) - \frac{bR^2}{4a} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) - R \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{\mu_n^3 J_1(\mu_n)} \left[\left(\frac{b_1}{a_1} - \frac{4\Delta T_0}{R^2}\right) \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{R^2} \sum_{j=1}^m a_j \Delta\tau_j\right) + \sum_{i=2}^m \left(\frac{b_i}{a_i} - \frac{b_{i-1}}{a_{i-1}}\right) \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{R^2} \sum_{j=1}^m a_j \Delta\tau_j\right) \right]. \quad (4)$$

Начальное распределение температуры в образце в начале первого участка берется таким же, как в работе [7]. Но при этом ошибка возникает только на первом участке, а на втором-третьем участке она практически исчезает. Если же подходящим образом выбрать начало первого участка, то ошибка от аппроксимации начального распределения параболой вообще отсутствует (например, выбирая за начало нагрева момент в пределах заведомо регулярного режима).

Уравнение (4) решалось относительно коэффициента температуропроводности методом конечно-разностной аппроксимации [9]. Практическая проверка методики проведена в процессе определения коэффициента температуропроводности стали 45. Результаты измерений, представленные на рис. 1, хорошо совпадают с литературными данными [10].

С целью определения коэффициентов температуропроводности путем прессования на 50-т прессе получали

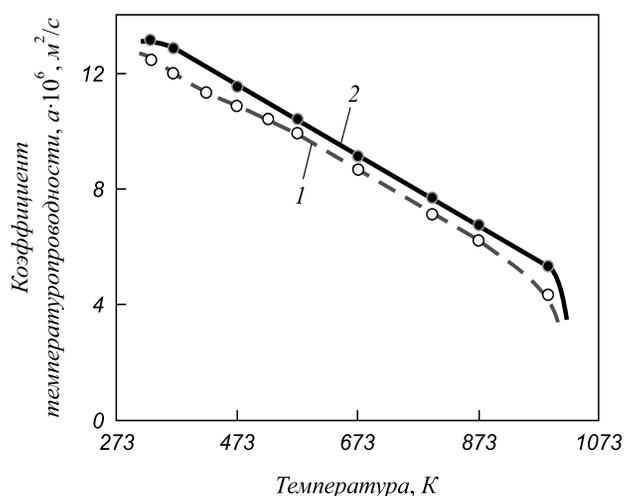


Рис. 1. Зависимость изменения коэффициента температуропроводности стали 45 от температуры: 1 – по результатам измерений; 2 – по данным работы [10]

цилиндрические образцы из порошкообразных доменных шлаков при давлении, обеспечивающем в образцах плотность, соответствующую плотности пористых и литых изделий. Помимо прессованных образцов, в опытах использовали также образцы, приготовленные из литого шлака. Исследуемые образцы помещали в печь с силитовыми нагревателями. Для исключения осевых потоков теплоты образцы изолировали с торцов прокладками из листового асбеста. Платиновые термопары вводили сверху через отверстия в соответствующие каналы и располагали в вертикальном положении вдоль оси и вдоль образующей – со стороны наружной поверхности образца. Горячие спаи термопар находились на уровне середины высоты цилиндра. Образец нагревали вместе с печью с постоянной скоростью, регулирование которой осуществляли изменением напряжения на зажимах силитовых стержней с помощью трансформатора [4].

Зависимости коэффициентов температуропроводности доменных шлаков НТМК и НЛМК, а также синтетических шлаков, содержащих от 0 до 15 % TiO_2 , от температуры представлены в виде усредненных графиков (для каждого образца проводилось 5 – 6 измерений) на рис. 2 и 3. Из рисунков видно, что для всех изученных шлаков в интервале температур 473 – 673 К наблюдаются экстремальные изменения величин коэффициентов температуропроводности, что согласно данным работы [11] можно объяснить изменением структурных напряжений в доменных шлаках, достигающих экстремальных значений при температурах 553, 803, 903 К и меняющих свой знак при температурах 673 и 853 К. С увеличением температуры выше 773 К изменение величин коэффициентов температуропроводности синтетических шлаков хорошо согласуются с данными для силикатных систем [12].

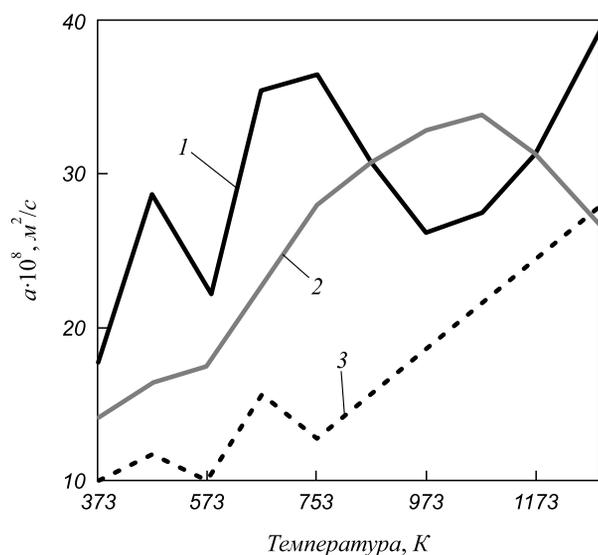


Рис. 2. Зависимость коэффициентов температуропроводности от температуры для шлаков: 1 – передельного чугуна НТМК (литой образец); 2 – ванадиевого чугуна НТМК (литой образец); 3 – передельного чугуна НЛМЗ (прессованный образец)

Из анализа кривых, приведенных на рис. 4, следует, что с изменением процентного содержания TiO_2 в шлаках во всем температурном интервале исследований наблюдается примерно аналогичная зависимость изменения величины коэффициента температуропроводности. Так, при содержании в шлаках 6,5 – 7,0 % TiO_2 , коэффициент a достигает своих экстремальных значений. Авторы работы [6] экстремальную зависимость коэффициента a от содержания TiO_2 объясняют координационным эффектом иона Ti^{4+} , т.е. переходом в точке перегиба кривой иона титана из четверной координации в шестерную.

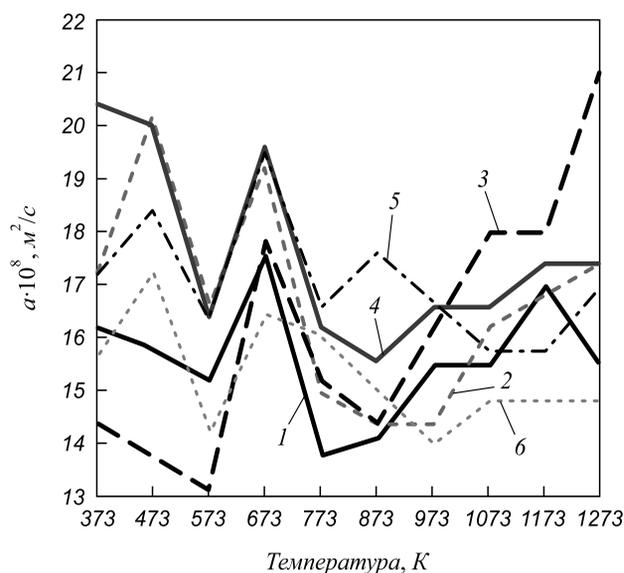


Рис. 3. Зависимость коэффициентов температуропроводности от температуры для синтетических шлаков с различным содержанием TiO_2 , %: 1 – 0; 2 – 3,1; 3 – 6,5; 4 – 8,7; 5 – 13,3; 6 – 15,0

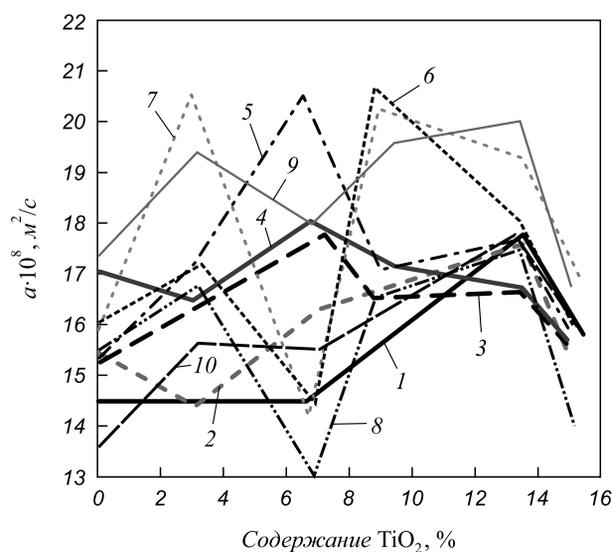


Рис. 4. Зависимость коэффициентов температуропроводности синтетических шлаков от содержания TiO_2 для различных температур, К: 1 – 373; 2 – 473; 3 – 573; 4 – 673; 5 – 773; 6 – 873; 7 – 973; 8 – 1073; 9 – 1173; 10 – 1273

Более низкие значения коэффициентов теплопроводности синтетических шлаков, полученных сплавлением в электрической печи сопротивления, можно объяснить тем, что их плотность составляет порядка 2400 кг/м³, а натуральных доменных шлаков – 2700 – 2800 кг/м³. Следовательно пористость шлаков будет различной. Различными будут и их теплофизические свойства. Доменные шлаки, в отличие от синтетических, содержат FeO, MnO, S и т. п. Химический состав доменных шлаков, в свою очередь, зависит от вида и свойств железных руд, качества кокса, вида выплавляемого чугуна и влияет на структуру и свойства затвердевших шлаков. Различия в составах железных руд и кокса в разных регионах страны обуславливает соответствующие различия в составе шлаков и их свойствах.

Структура шлаков, а, следовательно, и их свойства сильно зависят от скорости их охлаждения водой, паром или воздухом, которая также меняется в зависимости от способа получения шлака и его назначения. В гранулированных доменных шлаках содержание стекловидной фазы может достигать 98 %. Шлаковые стекла взаимодействуют с водой значительно интенсивнее, чем кристаллы минералов. Все отмеченное приводит к тому, что и теплофизические свойства шлаков будут различными.

Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К), определяли из выражения

$$\lambda = ac\rho,$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с; c – теплоемкость шлака, Дж/(кг·К); ρ – плотность шлака, кг/м³.

Полученные результаты определения λ представлены в виде графиков (рис. 5, 6), из которых видно, что

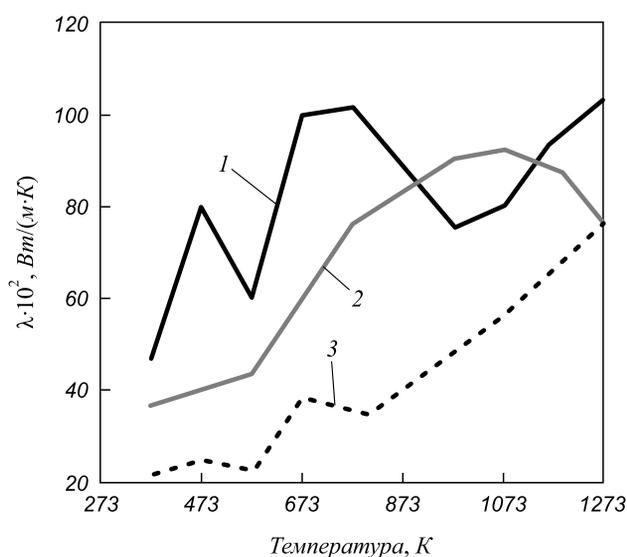


Рис. 5. Зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры для шлаков:

1 – переловного чугуна НТМК (литой образец); 2 – ванадиевого чугуна НТМК (литой образец); 3 – переловного чугуна НЛМЗ (прессованный образец)

характер изменения коэффициента теплопроводности доменных шлаков находится в качественном соответствии с кривой изменения коэффициента температуропроводности.

Выводы. С использованием существующих и усовершенствованных методов определения теплофизических свойств материалов найдены зависимости изменения энтальпии, теплоемкости, коэффициентов температуро- и теплопроводности натуральных и синтетических доменных шлаков от температуры в интервале от 293 до 1273 К и от содержания в них оксида титана. Полученные данные могут быть использованы в инженерных расчетах, связанных с проектированием новых установок по переработке доменных шлаков, при оптимизации режимных параметров работы существующих установок и при определении рациональных скоростей нагрева и охлаждения литых шлаковых изделий в процессе их термической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Осиновских Л.Л., Юрьев Б.П., Орининский Н.В., Братчиков С.Г. Влияние режима термообработки на скорость охлаждения литых шлаковых изделий // Литейное производство. 1974. № 1. С. 25 – 26.
- Кубашевский О., Олкокк С.Б. Металлургическая термехимия. – М.: Металлургия, 1983. – 391 с.
- Мищенко К.П., Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. – Л.: Химия, 1965. – 160 с.
- Рафалович И.М., Денисова И.А. Определение теплофизических свойств металлургических материалов. – М.: Металлургия, 1971. – 160 с.
- Юрьев Б.П. Методика определения температуропроводности материалов в условиях нестационарной теплопроводности // Изв. вуз. Черная металлургия, 2011. № 12. С. 26 – 28.
- Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин и др. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.

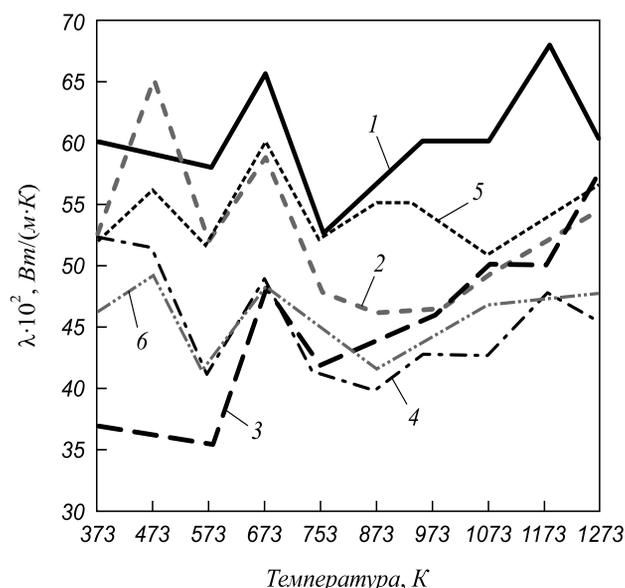


Рис. 6. Зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры для синтетических шлаков с различным содержанием TiO₂, %: 1 – 0; 2 – 3,1; 3 – 6,5; 4 – 8,7; 5 – 13,3; 6 – 15,0

7. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 150 с.
8. Кудрявцев Е.В., Чакалев К.Н., Шумаков Н.В. Нестационарный теплообмен. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 158 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1977. – 832 с.
10. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник/ Под ред. Б.Е.Неймарк. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 240 с.
11. Жило Н.Л., Груздев Ю.А., Горох А.В., Першина Р.Ф. Физические свойства и минералогический состав титанистых доменных шлаков // Изв. АН СССР. Металлы. 1969. № 6. С. 3 – 8.
12. Жило Н.Л., Груздев Ю.А., Горох А.В., Першина Р.Ф. Физические свойства шлаков системы CaO–TiO₂–SiO₂–Al₂O₃–MnO при 15 % Al₂O₃ и 12 % MnO // Изв. АН СССР. Металлы. 1970. № 1. С. 65 – 69.

© 2014 г. Юрьев Б.П.
Поступила 26 июня 2013 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. VOL. 57. No. 11, pp. 5–10.

STUDY OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BLAST FURNACE SLAG DURING ITS THERMAL TREATMENT

Yur'ev B.P., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal physics and computer science in metallurgy"* (yurev-b@mail.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. Study of thermophysical characteristics of natural and synthetic furnace slag was made. The dependence of changing enthalpy and thermal capacity of slag in the temperature interval from 293 to 1273 K was determined using the method of qualitative thermal analysis. The method of determining the coefficients of thermal conductivity of materials was improved according to thermogram of the cylindrical sample heating. In this procedure the thermal coefficients of blast furnace slag were determined. By using the coefficients of thermal conductivity and predefined values of the specific thermal capacity the dependence of thermal conductivity on temperature and content of titanium oxide (TiO₂) in slag was discovered. The obtained data can be used to optimize the operating parameters of existing processing facilities of reprocessing blast slag. The obtained data can be used in the design of new facilities, as well as to determine the optimal heating and cooling during the heat treatment of cast slag products.

Keywords: thermophysical properties, blast furnace slag, enthalpy, the coefficients of heat and thermal conductivity, titanium oxide, the temperature parameters, optimization, modes, contents.

REFERENCES

1. Osinovskikh L.L., Yur'ev B.P., Orininskii N.V., Bratchikov S.G. Effect of heat treatment conditions on the rate of cooling of molten slag products. *Liteinoe proizvodstvo*. 1974, no. 1, pp. 25–26. (In Russ.).
2. Kubashevskii O., Olkock S.B. *Metallurgicheskaya termokhimiya* [Metallurgical thermochemistry]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 391 p. (In Russ.).
3. Mishchenko K.P., Ravdel' A.A. *Kratkii spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Short reference of physico-chemical variables]. Leningrad: Khimiya, 1965. 160 p. (In Russ.).
4. Rafalovich I.M., Denisova I.A. *Opreделение teplofizicheskikh svoystv metallurgicheskikh materialov* [Determination of thermophysical properties of metallurgical materials]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 160 p. (In Russ.).
5. Yur'ev B.P. Method of determination of thermal diffusivity of materials under conditions of unsteady heat conduction. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 12, pp. 26–28. (In Russ.).
6. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Matyukhin V.I., Matyukhin O.V., Sheshukov O.Yu. *Opreделение teplofizicheskikh svoystv materialov metallurgicheskogo proizvodstva* [Determination of thermophysical properties of materials of metallurgical production]. Ekaterinburg: ООО "UIPTs", 2014. 180 p. (In Russ.).
7. Tait's N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [The technology of heating of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 1962. 150 p. (In Russ.).
8. Kudryavtsev E.V., Chakalev K.N., Shumakov N.V. *Nestatsionarnyi teploobmen* [Unsteady heat transfer]. Moscow: Izd. AN SSSR, 1961. 158 p. (In Russ.).
9. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. McGraw-Hill Book Company. 1968. (Russ.ed.: Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. Moscow: Nauka, 1970. 832 p.).
10. *Fizicheskie svoystva staley i splavov, primenyaemykh v energetike. Spravochnik* [Physical properties of steels and alloys used in the energy sector. Directory]. Neimark B.E. ed. Moscow, Leningrad: Energiya, 1967. 240 p. (In Russ.).
11. Zhilo N.L., Gruzdev Yu.A., Gorokh A.V., Pershina R.F. Physical properties and mineralogical composition of blast furnace titaniferous slag. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, 1969, no. 6, pp. 3–8. (In Russ.).
12. Zhilo N.L., Gruzdev Yu.A., Gorokh A.V., Pershina R.F. The physical properties of the slag system CaO–TiO₂–SiO₂–Al₂O₃–MnO at 15 % Al₂O₃ and 12 % MnO. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, 1970, no. 1, pp. 65–69. (In Russ.).

Received June 26, 2013