

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ В ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ УМЕРЕННЫХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ\*

*Меламуд С.Г., к.т.н., заместитель директора учебно-проектного центра*

*«Проектный институт УРФУ» (e1944@yandex.ru)*

*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.** Методами физико-химического анализа изучен процесс окисления магнетита и титаномагнетита в окислованных железорудных материалах при умеренных (400 – 1000 °С) и высоких (1000 – 1350 °С) температурах. Для изучения кинетики процесса окисления использовали брикеты из ольховского магнетитового и качканарского титаномагнетитового концентратов, а также образцы неофлюсованных и офлюсованных до основности 1,3 железорудных качканарских окатышей. Установлено, что при умеренных температурах лимитирующей стадией процесса окисления является диффузия реагента на участках шаровой поверхности, величина которых меньше общей поверхности шара. При высоких температурах как в изотермических, так и в неизотермических условиях лимитирующей стадией процесса является диффузия кислорода в порах окатышей. По кинетическим зависимостям изотермического окисления исследуемых материалов рассчитана кажущаяся энергия активации при заданных степенях превращения, изменение которой связано с изменением вида диффузии реагентов через слой продукта реакции. Определены кажущиеся коэффициенты диффузии кислорода в качканарских окатышах при температурах 500 – 1000 °С. Разработана методика определения степени окисления окатышей в зависимости от изменения времени и температуры в неизотермическом режиме. Показана возможность использования этой методики для расчета степени окисления окатышей при их обжиге на конвейерных машинах. Полученные в работе результаты могут быть использованы для определения степени завершенности окислительных процессов в обжигаемом слое окатышей и при оптимизации режимных параметров их термической обработки на обжиговых установках.

**Ключевые слова:** окисление, магнетит, титаномагнетит, брикеты, окатыши, анализ, диффузия, кинетика, метод, режим.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-378-384

Реакция окисления магнетита (титаномагнетита) является одной из основных в сложном комплексе физико-химических процессов при термической обработке магнетитовых материалов [1 – 9]. Анализ литературных данных по окислению магнетитовых материалов [10, 11] показывает, что этот процесс протекает последовательно в три стадии, которые различаются температурными интервалами: 1 – низкие (200 – 400 °С) температуры; 2 – умеренные (400 – 1000 °С) температуры; 3 – высокие (1000 – 1350 °С) температуры.

Целью настоящего исследования является изучение процесса окисления в железорудных материалах при умеренных и высоких температурах.

Образцами для испытаний служили брикеты из ольховского магнетитового (образцы 1 и 2) и качканарского титаномагнетитового (образец 3) концентратов, а также неофлюсованные и офлюсованные до основности 1,3 окатыши из качканарского титаномагнетитового концентрата (образцы  $Z_{ок}$  и  $Z_{ок.оф}$ ). Химический состав, крупность частиц ( $d$ ), удельная площадь поверхности частиц ( $S$ ) исходных материалов приведены в табл. 1.

Опыты проводили на дериватографе ОД-102.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке, постановление № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.006.

Для брикетированных материалов (образцы 1 – 3) были получены временные зависимости изменения скорости ( $v$ ) и степени окисления ( $\alpha$ ) при разных температурах (рис. 1). Для определения лимитирующего процесса второй стадии окисления экспериментальные кривые обрабатывали с помощью кинетических уравнений, представленных в работе [12]. Проверка применимости уравнений показала, что кривые окисления исследуемых материалов сравнительно хорошо описываются уравнением

$$\left(1 - \frac{2}{3}\alpha\right) - (1 - \alpha)^{2/3} = k\tau,$$

где  $k$  – константа скорости,  $c^{-1}$ .

Это уравнение характеризует диффузию реагента через слой шарообразного продукта. Для титаномагнетита кинетические зависимости описываются уравнением

$$\left[1 - (1 - \alpha)^{1/3}\right]^2 = k\tau.$$

Лимитирующим звеном процесса при этом является диффузия реагента на участках шаровой поверхности, величина которых значительно меньше общей поверхности шара. Среднеквадратичные отклонения экспери-

Характеристика исследованных образцов в исходном состоянии

Table 1. Characteristics of the studied samples in an initial state

Образец	Содержание, % (по массе)								d, мкм	S·10 <sup>-3</sup> , м <sup>2</sup> /кг
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
1	70,23	29,25	Сл.	0,72	0,67	0,55	0,28	0,40	50 – 74	1,14
2	70,23	29,25	Сл.	0,72	0,67	0,55	0,28	0,40	100 – 200	0,24
3	61,30	27,40	1,50	3,60	2,50	2,10	2,80	0,60	50 – 74	1,20

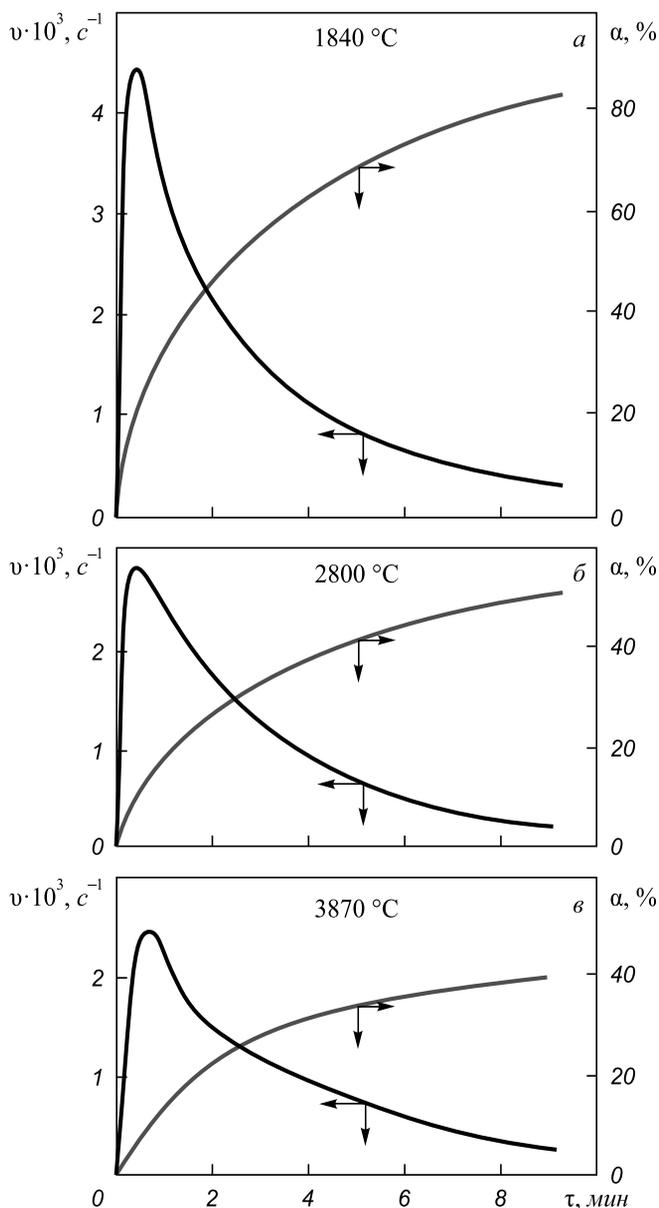


Рис. 1. Зависимости скорости и степени изотермического окисления образцов из ольховского магнетитового (а, б) и качканарского титаномагнетитового (в) концентратов от времени выдержки (τ) при температурах второй стадии процесса

Fig. 1. Dependences of velocity and the degree of isothermal oxidation of the samples from Olkhovka magnetite (a, b) and Kachkanar titanium-magnetite (e) concentrates on the curing time (τ) at the temperatures of the second stage of the process

ментальных значений от расчетных не превышали 2 %. При использовании других уравнений, представленных в работе [12], отклонения опытных данных составили 15 – 30 %.

По кинетическим зависимостям изотермического окисления исследуемых материалов, представленных в координатах lg v – α, рассчитали кажущиеся энергии активации E<sub>каж</sub> при заданных степенях превращения (табл. 2).

Учитывая диффузионный режим окисления исследуемых материалов, увеличение E<sub>каж</sub> по мере развития изотермического окисления можно объяснить изменением вида диффузии кислорода в слое образовавшегося продукта реакции за счет увеличения толщины этого слоя. Об этом же свидетельствует возрастание порядка n реакции по кислороду при окислении фракции 50 – 74 мкм: 0,72 при 550 °С, 0,80 при 640 °С, 0,85 при 800 °С, 0,90 при 850 °С. Поэтому можно предположить, что на начальной стадии диффузионного изотермического окисления одним из возможных путей доставки кислорода к реакционной зоне является диффузия по внутричастичным микропорам гематитового слоя.

Другим возможным процессом является диффузия кислорода или железа в твердой фазе. По ориентировочным оценкам коэффициент диффузии (D) по

Т а б л и ц а 2

Изменение кажущейся энергии активации изотермического окисления исследуемых материалов по ходу процесса (расчет при постоянной степени превращения)

Table 2. Change of apparent activation energy of isothermal oxidation of the studied materials during the process (calculation at the constant fractional conversion degree)

Образец 1		Образец 2		Образец 3	
α, %	E <sub>каж</sub> , кДж/моль	α, %	E <sub>каж</sub> , кДж/моль	α, %	E <sub>каж</sub> , кДж/моль
20	23	10	15	9	20
30	33	12	28	15	45
40	47	15	55	20	66
60	57	25	77	30	120

данным микроскопических измерений толщины гематитовых пластинок при температуре 600 °С для титаномагнетита составляет  $10^{-11} - 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ . Это значение коэффициента диффузии на 10–12 порядков выше коэффициентов самодиффузии кислорода и железа в гематите и магнетите. Поэтому реально допустить, что реагенты перемещаются по границам зерен.

В начальный период окисления магнетита спекания зерен практически нет, площадь поверхности межзеренных контактов стремится к нулю. Измеренная энергия активации соответствует таковой для диффузии газа в порах, т.е. составляет 2–4 кДж/моль. По мере возникновения новообразований гематита площадь границ зерен возрастает на несколько порядков. При этом имеет место высокая скорость диффузии реагирующих веществ по границам зерен, а измеряемая кажущаяся энергия активации соответствует диффузии в твердом теле (100–200 кДж/моль).

Полученные в экспериментах значения кажущейся энергии активации окисления для магнетитового (15–77 кДж/моль) и титаномагнетитового (20–120 кДж/моль) концентратов (табл. 2) соответствуют диффузионной области окисления при переходе кнудсеновской диффузии реагирующих частиц в поверхностную по границам зерен.

Следовательно, можно утверждать, что окисление исследуемых образцов в температурном интервале второй стадии (400–1000 °С) протекает в диффузионном режиме. Причем при малой толщине гематитового слоя имеет место диффузия кислорода по внутривчастичным микропорам, а в дальнейшем – диффузия реагирующих частиц по образовавшимся при спекании границам зерен [13–15].

Иные закономерности окисления магнетита и титаномагнетита в исследуемых образцах наблюдаются при неизотермическом нагреве образцов. Кинетические параметры процесса в интервале температур 400–1000 °С, рассчитанные по результатам опытов при разных скоростях нагрева, представлены ниже.

Магнетитовый концентрат		Титаномагнетитовый концентрат	
$\alpha$ , %	$E_{\text{каж}}$ , кДж/моль	$\alpha$ , %	$E_{\text{каж}}$ , кДж/моль
30	45	15	100
40	32	30	38
50	31	50	21
70	17	55	14

При увеличении степени окисления магнетитового концентрата от 30 до 70 % кажущаяся энергия активации снижается от 45 до 17 кДж/моль, а в случае титаномагнетитового концентрата при изменении  $\alpha$  от 15 до 55 %  $E_{\text{каж}}$  уменьшается от 100 до 14 кДж/моль.

Полученные результаты могут быть связаны с изменением лимитирующего звена процесса неизотерми-

ческого окисления. При увеличении скорости нагрева изучаемых образцов процесс окисления в большей степени переносится в область высоких температур и может лимитироваться диффузией кислорода по межчастичным порам образца.

Это предположение проверено путем изучения неизотермического окисления окатышей из качканарского титаномагнетитового концентрата (образец  $Z_{\text{ок}}$ ) при скоростях нагрева 0,50, 0,83, 1,17 и 1,70 °С/с. Опыты проводили в печи Таммана. Степень окисления по ходу процесса рассчитывали по результатам химического анализа исходных, а также нагретых до заданной температуры и закаленных в воде окатышей. Анализ изменения степени окисления окатышей при нагреве на воздухе с разными скоростями показал, что при всех скоростях нагрева наблюдается двухстадийное окисление. Причем независимо от скорости нагрева первая стадия заканчивается при температуре 430–470 °С и степени окисления окатышей 12–14 %. Однако при 1000 °С степень окисления окатышей различна. Меньшей скорости нагрева соответствует большая степень окисления.

Минералогические исследования структуры окатышей, окисленных при 500 °С, показали, что окисление происходило на дефектных участках поверхности зерен во всем объеме окатыша. Окатыши, окисленные в интервале температур 500–1000 °С, имели зональное строение: окисленную оболочку, титаномагнетитовое ядро. При этом окисленность титаномагнетитовых зерен в ядре окатышей не менялась. Толщина окисленной оболочки увеличивалась с повышением конечной температуры окисления и уменьшением скорости нагрева окатышей. В окисленной оболочке по мере повышения температуры наблюдалось вначале поверхностное, а затем объемное окисление рудных зерен. Зональный характер окисления окатышей при скоростях нагрева 0,5 °С/с и выше можно объяснить тем, что окисление в большей степени переносится в область высоких температур. При этом скорость химической реакции окисления магнетита высокая, процесс окисления начинает лимитироваться диффузией кислорода по межчастичным порам окатыша.

Таким образом, процесс окисления титаномагнетита в качканарских окатышах на второй (400–1000 °С) стадии протекает в диффузионном режиме. При скоростях нагрева до 0,5 °С/с окисление лимитируется диффузией реагирующих частиц через окисленную оболочку на рудных зернах по всему объему окатыша. При скоростях нагрева 0,5 °С/с и выше наблюдается зональный характер окисления окатышей, связанный с замедленной диффузией кислорода по межчастичным порам.

Для повышения эффективности использования окислительного упрочняющего высокотемпературного обжига при производстве железорудных окатышей также необходимо изучение процесса окисления магнетита в них при температуре 1000 °С и выше.

Для испытаний были взяты нефлюсованные (образец 3<sub>ок</sub>) и офлюсованные до основности 1,3 (образец 3<sub>ок.оф</sub>) окатыши, химический состав которых приведен в табл. 3.

Окислительный обжиг окатышей проводили в изотермических условиях в температурном интервале 800 – 1350 °С в токе воздуха с расходом 0,6 м<sup>3</sup>/ч. Окатыши размещали в корзинах из жаропрочного материала. По истечении определенного времени (время выдержки изменяли в пределах 3 – 34 мин) всю партию окатышей быстро охлаждали в воде. В продуктах обжига химическим анализом определяли содержание оксида железа FeO и железа Fe<sub>общ</sub>. Структуры окатышей и рудных зерен исследовали оптическим методом.

Зависимости содержания оксида железа FeO в обожженных окатышах от температуры и продолжительности нагрева в изотермических условиях показаны на рис. 2. Повышение температуры нагрева нефлюсованных окатышей до 1100 °С и офлюсованных окатышей до 1050 °С способствует их окислению и уменьшает содержание в них оксида железа FeO. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению количества расплава в окатышах и ускорению процесса жидкофазного спекания в них. Степень изотермического окисления при этом снижается, а содержание оксида железа FeO в окатышах увеличивается.

Т а б л и ц а 3

Химический состав сырых качканарских окатышей

Table 3. Chemical composition of Kachkanar raw pellets

Образец	Содержание, % (по массе)								
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ПМПП
3 <sub>ок</sub>	62,08	27,53	1,17	3,78	3,47	2,41	2,46	0,50	1,00
3 <sub>ок.оф</sub>	57,27	23,90	4,86	3,57	2,47	2,41	2,30	0,55	4,22

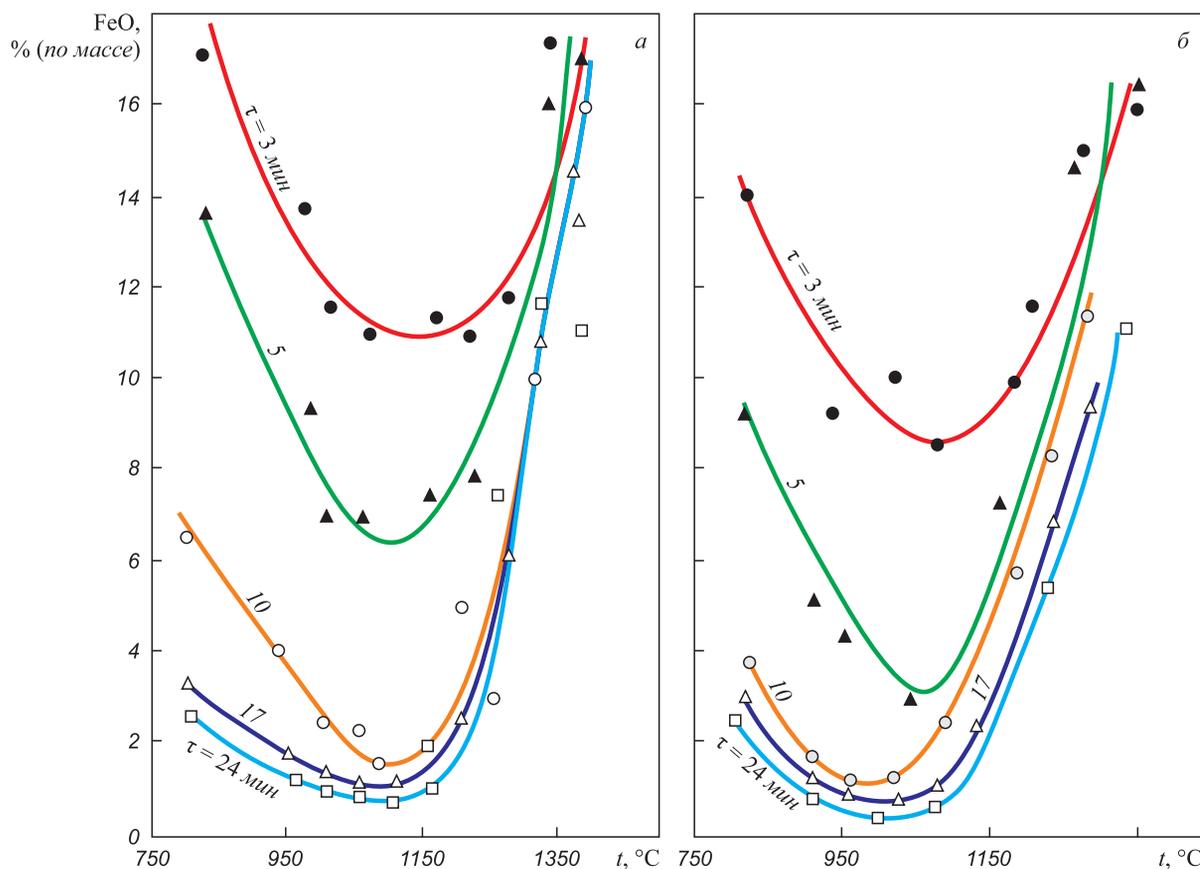


Рис. 2. Влияние температуры и продолжительности изотермической выдержки при окислительном обжиге нефлюсованных (а) и офлюсованных (б) качканарских окатышей на содержание в них оксида железа FeO

Fig. 2. Influence of temperature and the duration of isothermal exposure at the oxidizing burning of nonfluxed (a) and fluxed (б) Kachkanar pellets on the content of ferric oxide FeO in them

Минералогические исследования окатышей показали наличие зональной структуры. Лимитирующей стадией процесса окисления окатышей в этом случае является диффузия кислорода по межчастичным порам к реакционной поверхности рудных зерен. Степень окисления окатышей рассчитывали с учетом данных химического анализа обожженного материала. Зависимость степени окисления окатышей от времени выдержки при температурах 800 – 1350 °С описывается уравнением [12]

$$\frac{1}{2} \left[ 1 - (1 - \alpha)^{2/3} \right] - \frac{1}{3} \alpha = k\tau,$$

где  $k = \frac{3,5D(C_0 - C_p)}{\rho g_{\text{FeO}}^0 r_0^2 (t + 273)}$  – константа скорости,  $\text{с}^{-1}$ ;  $D$  – кажущийся коэффициент диффузии кислорода,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C_0$  и  $C_p$  – концентрация кислорода в газовой фазе и равновесная концентрация кислорода, определяемая диссоциацией гематита, доли ед.;  $\rho$  – плотность окатыша,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g_{\text{FeO}}^0$  – содержание оксида железа FeO в исходном окатыше, доли ед.;  $r_0$  – радиус окатыша, м;  $t$  – температура, °С;  $\tau$  – время, с.

Значения константы скорости  $k$ , которые определяли по тангенсу угла наклона прямолинейной зависимости  $\alpha - \tau$ , использовали для расчетов коэффициента диффузии кислорода

$$D = \frac{\rho g_{\text{FeO}}^0 r_0^2 (t + 273) k}{3,5(C_0 - C_p)}.$$

В расчетах приняты следующие значения:  $\rho = 3,7 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $g_{\text{FeO}}^0 = 0,270$  для неофлюсованных окатышей,  $g_{\text{FeO}}^0 = 0,252$  для офлюсованных окатышей;  $C_0 = 0,21$ ;  $C_p \approx 0$ ;  $r_0 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Зависимости кажущегося коэффициента диффузии кислорода в неофлюсованных и офлюсованных окатышах от температуры приведены на рис. 3. При температурах 800 °С и ниже основность окатышей практически не оказывает влияния на значения коэффициента диффузии кислорода. В интервале температур 900 – 1150 °С значение коэффициента диффузии в офлюсованных окатышах больше. Это связано с увеличением пористости и некоторой трещиноватостью офлюсованных окатышей вследствие выделения оксида углерода  $\text{CO}_2$  при разложении известняка.

По результатам минералогического анализа обожженных окатышей при температурах 1050 – 1350 °С наблюдается появление расплава в неокисленном ядре, что способствует развитию процесса жидкофазного спекания и уменьшению пористости образцов.

Кажущийся коэффициент диффузии можно вычислить и по данным расчета неизотермического окисления окатышей. В этом случае для расчетов применимо дифференциальное уравнение

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = 3k \left( \frac{1}{1 - (1 - \alpha)^{1/3}} - 1 \right).$$

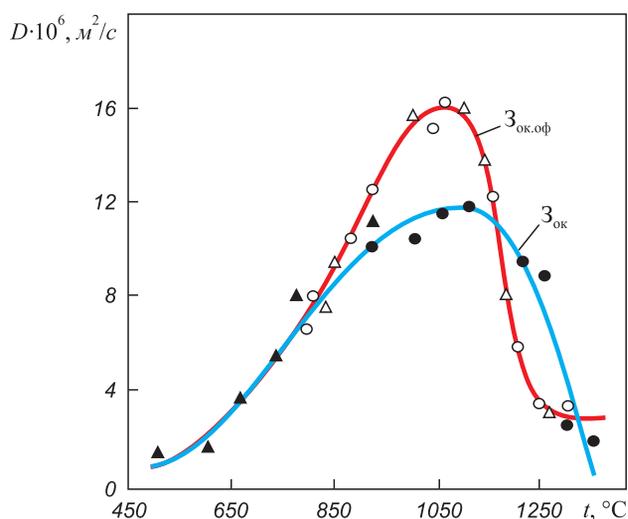


Рис. 3. Влияние температуры на кажущийся коэффициент диффузии кислорода в неофлюсованных ( $3_{\text{ок}}$ ) и офлюсованных ( $3_{\text{ок,оф}}$ ) качканарских окатышах при изотермическом (● и ○ соответственно) и неизотермическом (▲ и △ соответственно) нагревах

Fig. 3. Influence of temperature on the apparent coefficient of the oxygen diffusion in nonfluxed ( $3_{\text{ок}}$ ) and fluxed ( $3_{\text{ок,оф}}$ ) Kachkanar pellets at the isothermal (● and ○ respectively) and non-isothermal (▲ and △ respectively) heating

Экспериментальное определение значений  $D$  при разных температурах проводили, используя следующую методику. Офлюсованные окатыши нагревали в печи электрического сопротивления с постоянной скоростью 1,7 °С/с до определенной температуры в интервале 800 – 1250 °С и закаливали в воде для фиксации их химического состава. Зная содержания FeO и  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  в исходных окатышах и после их окисления в течение времени  $\tau$ , рассчитывали степень их окисления. Строили график зависимости  $\alpha = f(t, \tau)$  и методом графического дифференцирования определяли значения производных  $da/dt$  при разных температурах.

Полученные значения  $da/dt$  и  $\alpha$  использовали для расчета константы скорости и кажущегося коэффициента диффузии кислорода при разных температурах. В табл. 4 приведены исходные данные и результаты расчета.

Полученные значения кажущегося коэффициента диффузии кислорода в окатышах, обожженных при неизотермическом нагреве, совпадают со значениями, рассчитанными для тех же температур по результатам окисления окатышей в изотермических условиях.

**Выводы.** Изучены закономерности окисления ольховского магнетитового и качканарского титаномагнетитового концентратов при умеренных и высоких температурах с использованием метода термогравиметрического исследования. Для неофлюсованных и офлюсованных качканарских окатышей найдены коэффициенты диффузии кислорода, разработана методика определения степени окисления окатышей в зависимости от продолжительности обжига и температуры. Эта

Т а б л и ц а 4

Результаты расчета кажущегося коэффициента диффузии по данным неизотермического окисления офлюсованных качканарских окатышей

Table 4. Calculation results of the apparent diffusion coefficient according to the data of non-isothermal oxidation of Kachkanar fluxed pellets

$t$ , °C	$\alpha$ , %/100	$(da/dt) \cdot 10^3$ , с <sup>-1</sup>	$k \cdot 10^4$ , с <sup>-1</sup>	$C_p$ , доли ед.	$D \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
825	0,56	1,30	1,36	0	7,50
875	0,60	1,50	1,78	0	10,30
925	0,64	1,50	2,05	0	12,37
975	0,69	1,50	2,42	0	15,10
1000	0,72	1,37	2,42	0	15,50
1020	0,74	1,30	2,46	0	16,00
1075	0,78	1,10	2,40	0	16,25
1125	0,81	0,80	1,97	0	13,80
1175	0,83	0,43	1,16	0,002	8,45
1225	0,85	0,20	0,57	0,043	4,34
1275	0,86	0,10	0,30	0,120	2,36

методика может быть использована для определения степени завершенности окислительных процессов в обжиговых агрегатах конвейерного типа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Oxidation of iron-ore pellets // *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41. № 5. P. 400 – 403.
2. Mazanek E., Krupinska Z., Kulgawezuk D. Zur Oxydationsreaktion von Magnetit // *Arch. Eisenhüttenwesen*. 1973. B.44. № 8. S. 571 – 577.
3. Papanastassion D., Bitsianes G. Mechanism and kinetics underlying the oxidation of magnetite in the induration of iron ore pellets // *Met.Trans.* 1973. Vol. 4. № 2. P. 487 – 496.
4. Readman P.W., O'Reilly W. Oxidation processes in titanomagnetites // *Z. Geophys.* 1971. B. 37. № 3. S. 329 – 338.
5. Кокорин Л.К., Лелеко С.Н. Производство окисленных окатышей. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 280 с.
6. Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. Общая минералогия. – М.: Академия, 2008. – 360 с.
7. Плотников С.В., Бормотов А.С. Механизм фазовых превращений при окислительном обжиге промышленных окатышей из концентратов руд железистых кварцитов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 3. С. 29 – 32.
8. Юсфин Ю.С., Малышева Т.Я., Плотников С.В. Критерии качества железорудных окатышей из концентратов руд магнетитовых кварцитов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2009. № 5. С. 7 – 10.
9. Юсфин Ю.С., Базилевич Т.Н. Обжиг железорудных окатышей. – М.: Металлургия, 1973. – 272 с.
10. Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Conversion of magnetite to hematite in iron-ore pellets // *Steel in Translation*. 2007. Vol. 37. № 4. P. 336 – 338.
11. Abzalov V.M., Klein V.I., Yur'ev B.P. Oxygen diffusion in pores of iron-ore pellets // *Steel in Translation*. 2008. Vol. 38. № 6. P. 421 – 423.
12. Уэндландт У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 526 с.
13. Мерер Х. Диффузия в твердых телах. – М.: Интеллект, 2011. – 536 с.
14. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопердача в химической кинетике. – М.: Интеллект, 2008. – 408 с.
15. Горбачев В.А., Абзалов В.М., Юрьев Б.П. Поведение реакционной зоны при окислительном обжиге железорудных окатышей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2007. № 6. С. 11 – 13.

Поступила 18 марта 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 6, pp. 378–384.

## STUDY OF THE OXIDATION PROCESS IN IRON-ORE MATERIALS AT TEMPERATE AND HIGH TEMPERATURES

S.G. Melamud, B.P. Yur'ev

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The process of oxidation of magnetite and titanium-magnetite in lumped iron-ore materials at temperate (400 – 1000 °C) and high (1000 – 1300 °C) temperatures was studied by using methods of physical-chemical analysis. Kinetics of the diffusion process was studied on briquettes of Olhov and Kachkanar titanium-magnetite concentrate and also on the samples of non-fluxed and fluxed to the basicity 1.3 iron-ore Kachkanar pellets. It was determined that at temperate temperatures the diffusion of reagent is the limiting point of the oxidation process on the zones of spherical surface the size of which is smaller than the total surface of the spherical object. At high temperatures diffusion of oxygen in the pores of pellets is the limiting point of the process in the isothermal and nonisothermal conditions as well. According to kinetic dependence the isothermal oxidation of investigated materials, the apparent energy of activation at the set degrees of conversion was calculated, and changing of the activation is connected with trans-

formation of the type of diffusion of reagents through the layer of the reaction product. The apparent coefficients of diffusion of oxygen applied to iron-fluxed Kachkanar pellets for temperature 500 – 1000 °C were defined. The methods of definition of the oxidation degree of pellets were obtained in dependence on changing time and temperature at nonisothermal operational parameters. The possibility of using the given methods for calculation of the oxidation degree of pellets at their roasting in the conveyer roasting machinery was shown. The obtained results can be used for definition of the completing degree of oxidizing processes in the roasting layer of pellets and at optimizing of operational parameters in roasting machinery.

**Keywords:** oxidation, magnetite, titanium-magnetite, briquette, pellets, analysis, diffusion, kinetics, methods, operational parameters.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-6-378-384

#### REFERENCES

1. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Oxidation of iron-ore pellets. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 5, pp. 400–403.

2. Mazanek E., Krupinska Z., Kulgawezuk D. Zur Oxydationsreaktion von Magnetit. *Arch. Eisenhüttenwesen*. 1973, vol. 44, no. 8, pp. 571–577.
  3. Papanastassion D., Bitsianes G. Mechanism and kinetics underlying the oxidation of magnetite in the induration of iron ore pellets. *Met. Trans.* 1973, vol. 4, no. 2, pp. 487–496.
  4. Readman P.W., O'Reilly W. Oxidation processes in titanomagnetites. *Z. Geophys.* 1971, vol. 37, no. 3, pp. 329–338.
  5. Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo oksislennykh okatyshei* [Production of oxidated pellets]. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr PR i reklamy "Marat", 2004, 280 p. (In Russ.).
  6. Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. *Obshchaya mineralogiya* [General mineralogy]. Moscow: Akademiya, 2008, 360 p. (In Russ.).
  7. Plotnikov S.V., Bormotov A.S. Phase transformation mechanism at oxidation burning of industrial pellets, produced from iron quartzite ores. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 3, pp. 29–32. (In Russ.).
  8. Yusfin Yu.S., Malysheva T.Ya., Plotnikov S.V. Quality criteria of iron-ore pellets from the concentrates of magnetite quartzite ores. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 5, pp. 7–10. (In Russ.).
  9. Yusfin Yu.S., Bazilevich T.N. *Obzhig zhelezorudnykh okatyshei* [Roasting of iron-ore pellets]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 272 p. (In Russ.).
  10. Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Conversion of magnetite to hematite in iron-ore pellets. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 4, pp. 336–338.
  11. Abzalov V.M., Klein V.I., Yur'ev B.P. Oxygen diffusion in pores of iron-ore pellets. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 6, pp. 421–423.
  12. Wendlandt Wesley Wm. *Thermal methods of analysis*. New York: Interscience Publishers, 1964. 424 p. (Russ.ed.: Wendlandt W. *Termicheskie metody analiza*. Moscow: Mir, 1978, 526 p.).
  13. Mehrer Helmut. *Diffusion in solids. Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. (Russ.ed.: Mehrer H. *Diffuziya v tverdykh telakh*. Moscow: Intellect, 2011, 536 p.).
  14. Frank–Kamenetskii D.A. *Osnovy makrokinetiki. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike* [Basis of macrokinetics. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: Intellect, 2008, 408 p. (In Russ.).
  15. Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Behavior of the reaction zone at the oxidizing roasting of iron-ore pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 6, pp. 11–13. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the Russian Federation Government, enactment no. 211, contract no. 02.A03.21.006.
- Information about the authors:**
- S.G. Melamud**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Deputy Director of Training and Design Center "URFU Design Institute" (e1944@yandex.ru)
- B.P. Yur'ev**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (yurev-b@mail.ru)

Received March 18, 2014