

М. М. Гасик /д. т. н./, М. И. Гасик /д. т. н./

Национальная металлургическая академия  
Украины, г. Днепро, Украина  
e-mail: tehnosplavy@ua.fm

С. П. Шуваев

ПАО «Орджоникидзевский горно-  
обогатительный комбинат» (ОГОК),  
г. Покров, Украина  
e-mail: shuvaev@gmail.com

## Моделирование термодинамического равновесия фаз комплексных оксидных систем в процессе агломерации марганцевых концентратов

М. М. Gasik /Dr. Sci. (Tech.)/,  
М. I. Gasik /Dr. Sci. (Tech.)/

National Metallurgical Academy,  
Dnipro, Ukraine

e-mail: tehnosplavy@ua.fm

S. P. Shuvaev

PJSG «OGOK», Pokrov, Ukraine

e-mail: shuvaev@gmail.com

## Modeling of thermodynamics of phase equilibrium of complex oxide systems during agglomeration process manganese concentrates

**Цель.** Термодинамическое моделирование равновесия фазового состава аглошихты в процессе спекания и при нагреве в интервале температур 900–1300 °С с целью совершенствования технологии производства марганцевого агломерата с вовлечением тонкозернистого концентрата высокоинтенсивной сожрой магнитной сепарации шлама отработанного шламонакопителя.

**Методика.** Физико-химическое исследование термодинамики равновесия минеральных фаз в многокомпонентных оксидных системах выполнено с использованием модуля «Equilib» программы «FACTSage 6.0» и баз данных «FTOxid» и «FACT» применительно к температурам агломерации марганцевых концентратов.

**Научная новизна.** С использованием основных научно-методических подходов моделирования термодинамического равновесия комплексных оксидных систем с выделением однотипных твердых растворов впервые выполнены расчеты фазового состава жидкой фазы, монооксидной фазы, оливиновой и тетраэдрической фаз, а также галаксита. Исследован состав фаз в агломерате, полученном спеканием аглошихты, и в готовом агломерате при его повторном нагреве, показана корреляция расчетов с данными микрзонда РСМА образцов агломерата.

**Практическая значимость.** Полученные в работе результаты исследований имеют (наряду с научной новизной) практическую значимость для совершенствования технологии получения марганцевого агломерата. (Ил. 6. Табл. 5. Библиогр.: 6 назв.)

**Ключевые слова:** моделирование, термодинамическое равновесие, оксидные системы, температура, марганцевый агломерат, рентгеноструктурный микроанализ.

**Постановка проблемной задачи.** Одной из приоритетных задач ГМК Украины является повышение полезного использования добываемой в Никопольском марганцево-рудном бассейне оксидной и карбонатной руды на всех стадиях сквозной технологической схемы ее переработки – обогащения, агломерации марганцевых концентратов и выплавки марганцевых ферросплавов [1]. Анализ информационного ресурса данных о потерях марганца на каждой стадии

переработки руды, агломерата, выплавки марганцевых ферросплавов свидетельствует, что при обогащении полезное извлечение марганца из руды в товарные концентраты составляет 75–80 % [2].

Таким образом, 20–25 % марганца добытой руды теряется со шламами, которые «складируются» в шламонакопителях. С начала ввода в эксплуатацию Орджоникидзевского ГОК в шламохранилищах и действующих шламона-

копителях «Кривые луки» и Чкаловской обогатительной фабрики накопилось свыше 150 млн т шлама. Причем в ранее отработанных шламонакопителях содержание марганца в шламе составляет от 13 до 19 % против 10–11 % в шламах, образующихся по действующей технологии обогащения марганцевой руды.

В 2011 г. на БОАФ ПАО «ОГОК» было начато крупнотоннажное промышленное освоение и последующее производство товарных марганцевых концентратов по разработанному инновационному способу обогащения шламов отработанных шламонакопителей способом высокоинтенсивной магнитной мокрой сепарации [3; 4].

Получаемый марганцевый концентрат содержит не менее 35 % Mn и классифицируется по двум классам крупности – зернистый (класс крупности 10–1 мм) и тонкозернистый (1–0 мм). Концентрат обоих классов крупности подвергается агломерации на БОАФ и цехе агломерации ПАО «НЗФ» в составе концентратов гравитационного обогащения.

Агломерат сорта АМ-2, получаемый с использованием в аглошихтах определенных долей концентрата высокоинтенсивного магнитного мокрого обогащения, характеризуется повышенной механической прочностью, но вместе с тем, в зависимости от доли его в аглошихте, несколько пониженной температурой начала оплавления, что оказывает влияние на процессы жидкофазного образования в верхних горизонтах рудовосстановительных дуговых электропечей при выплавке ферросиликомарганца.

Настоящая работа выполнена с целью изучения методом компьютерного моделирования термодинамического равновесия жидкой фазы

и фаз твердых растворов в агломерате в зависимости от температуры и направлена на решение проблемной задачи – повышение полезного извлечения марганца из добываемой руды за счет дообогащения шламов.

**Формулировка цели.** Разработка физико-химической модели компьютерного расчета термодинамического равновесия фаз и минеральных образований в процессе агломерации с целью выбора рациональных составов аглошихты и температурно-временных параметров агломерации при получении агломерата АМ-2 с использованием в составе шихты концентратов высокоинтенсивной магнитной мокрой сепарации шламов.

**Изложение основного материала исследования**

...Фундаментальные исследования не направлены на конкретные прикладные цели. Но страна, которая не считает эти исследования приоритетом № 1, допускает историческую ошибку

*Президент Франции Н. Саркози\**

**1. Исходные данные и допущения**

В качестве исходных данных принимали химический состав шихты агломерата из 1 и 2 сорта ЧОФ\*\* (11,45 и 49,10 % соответственно), 13,45 % 2-сорт (обе фракции) и 26,0 % карбонатного концентрата (табл. 1).

Состав шихты усредняли, добавка коксика составила 10 % к концентрату (зольность 21 %). Смесь пересчитывали с учетом того, что все летучие, вода, сера и карбонаты уходят до достижения высоких температур, и этот состав, включающий только оксиды и углерод, приводили к

Таблица 1

**Химический состав марганцевых окисных и карбонатного концентрата для производства агломерата АМ-2 с вовлечением в аглошихту зернистых концентратов классов крупности 10–1 мм и 1–0 мм**

№ п/п	Наименование материала с концентратами	Содержание компонентов, %									Количество в составе аглошихты, % масс.
		Mn	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	ППП	W <sub>p</sub>	
1	1-сорт ЧОФ	45,3	13,1	2,2	1,4	2,0	3,0	0,21	12,2	15,2	11,45
2	2-сорт ЧОФ	38,0	15,1	4,7	2,4	2,2	2,7	0,20	16,2	10,0	49,10
3	2-сорт фракции 10–1 мм	37,4	24,5	2,2	1,4	1,9	2,4	0,16	10,6	13,2	6,32
4	2-сорт фракции 1–0 мм	37,4	24,5	2,2	1,4	1,9	2,4	0,16	10,6	15,2	7,13
5	Карбонатный	29,4	9,5	12,2	1,9	2,1	2,3	0,25	30,0	9,8	26,0
6	Агломерат <sup>х)</sup> АМ-2	41,6	23,1	5,7	2,3	3,0	4,41	0,22	-	-	-

<sup>х)</sup> Химический состав марганцевого агломерата, получаемого спеканием на агломашине К4-50 (62 м<sup>2</sup>) БОАФ.

\*Президент Франции Н. Саркози сообщил (2010 г.) о решении правительства вложить 35 млрд евро на развитие фундаментальных исследований. Вестник РАН, 2011, т. 81, № 10, с. 882.

\*\*ЧОФ – Чкаловская обогатительная фабрика ПАО «ОГОК».

равновесию. В газовой фазе учитывали только CO и CO<sub>2</sub>, которые могут образоваться из самой шихты, без подвода воздуха и газа, т. к. их точная подача и состав в зоне не известны.

С целью допустимого упрощения учитывали содержание только основных компонентов в исходном концентрате и агломерате (Mn, SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, P). Система с указанными компонентами соответственно химическому составу приводилась в равновесие при 900–1300 °C с использованием модуля «Equilib» программы «FACTSage 6.0» и баз данных «FTOxid» и «FACT». В общем случае в такой системе могут присутствовать до 390 соединений и до 48 различных растворов. По результатам предварительного анализа были определены фазы, которые являются наиболее термодинамически стабильными (их собственная активность равна единице), а также их содержание превышает 10<sup>-23</sup> %.

**Физико-химическое обоснование выбора фаз предсказуемого моделирования термодинамического равновесия многокомпонентных оксидных систем.** На основании анализа информационного ресурса данных с определенной степенью достоверности в качестве определяющих участие в термодинамическом равновесии являются следующие однотипные фазы, описание характеристик которых приводится ниже.

**Жидкая фаза (шлак)** включает расплав, могущий содержать оксиды Al, As, B, Ca, Co, Cr<sup>(II,III)</sup>, Cu<sup>(I)</sup>, Fe<sup>(II,III)</sup>, Ge, K, Mg, Mn<sup>(II,III)</sup>, Na, Ni, Pb, Si, Sn, Zn, Zr, а также до 10 % масс. фосфата (PO<sub>4</sub>). При высоком содержании SiO<sub>2</sub> возможно расслоение на 2 или 3 жидкости. Для жидкой фазы не все композиции в сложных системах были проверены, и подсистемы с недостаточным количеством данных считались идеальными.

**Моноксид (структура галита)** включает твердый раствор FeO–CaO–MgO–MnO–NiO–CoO во всем диапазоне составов, а также возможные добавки Al<sup>(III)</sup>, Fe<sup>(III)</sup>, Cr<sup>(III)</sup>, Ti<sup>(IV)</sup>, Zn, Zr. Минералогически эта фаза эквивалентна вюстититу, периклазу, магнезиальному вюстититу, мангановюстититу, манганозититу (Mn<sub>x</sub>O). Фаза может иметь расслоение при высоком содержании CaO.

**Оливин\*** (оксидный твердый раствор) включает систему Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>–Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>–Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>–Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>–Co<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>–Ni<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>–Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Распределение катионов между двумя подрешетками принято во

внимание таким образом: (Ca, Fe, Mg, Mn, Co, Ni, Zn)[Ca, Fe, Mg, Mn, Co, Ni, Zn]SiO<sub>4</sub>. Минералогически фаза эквивалентна форстериту (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), фаялиту (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), тейфройту (Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), монтичеллиту (CaMgSiO<sub>4</sub>), кирштайнититу (CaFeSiO<sub>4</sub>) и ларниту (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>). Фаза может иметь расслоение при наличии Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Таким образом, «оливиновая фаза» не означает именно оливина как минерал, а рассматривается как твердый раствор ортосиликатов (Me1, Me2)SiO<sub>4</sub>.

**Тетраэдрическая шпинель\*\*** включает систему [Fe<sup>(II,III)</sup>, Mn<sup>(II,III)</sup>, Cr<sup>(II,III)</sup>][Fe<sup>(II,III)</sup>, Mn<sup>(II,III)</sup>, Cr<sup>(II,III)</sup>, Va]<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Va – вакансии), минералогически эквивалентную гаусманиту Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> с катионами Fe и Cr.

Следует отметить, что для исследованных составов агломерата других твердых растворов (гаусманит, биксбеит (Mn<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, алюмосиликаты, другие соединения) в равновесии не обнаружено.

Стехиометрической фазой, устойчивой в данной системе в интервале температур 900–1300 °C и наиболее стабильной из всех рассмотренных вариантов является галаксит (фаза шпинельного типа MnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

**2. Расчет равновесия**

Результаты расчета равновесия фаз для исходной аглошихты показаны в табл. 2 и рис. 1–3. Уже при 900 °C наблюдается некоторое количество (3–5 %) жидкой фазы, состоящей главным образом из фосфатной фазы, впоследствии разбавляемой SiO<sub>2</sub> и CaO, и в которой практически отсутствует марганец.

Таблица 2  
**Равновесное состояние фаз (% масс.) для исходной шихты**

T (°C)	Шлак	MeO	Оливин A1 <sup>x)</sup>	Оливин A2 <sup>x)</sup>	Галаксит
900	2,99	30,83	32,20	29,14	4,84
950	3,07	30,82	33,16	28,14	4,81
1000	4,45	30,97	39,15	20,73	4,70
1050	4,70	31,06	42,96	16,66	4,63
1100	4,83	31,14	56,30	3,18	4,55
1150	4,92	32,23	59,40	–	4,45
1200	4,99	31,33	59,34	–	4,34
1250	5,04	31,44	59,29	–	4,22
1300	5,10	31,57	59,25	–	4,09

x) Ведущие фазы для оливина A1 (в порядке убывания концентрации): MnMnSiO<sub>4</sub>, CaMnSiO<sub>4</sub>, MnMgSiO<sub>4</sub>, MnCaSiO<sub>4</sub>, CaMgSiO<sub>4</sub>, CaCaSiO<sub>4</sub>; для оливина A2 также CaFeSiO<sub>4</sub>.

\*Оливин – природный минерал (Mg, Fe)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>] [5]. Известен изоморфный ряд минералов группы оливина – форстерит Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> – фаялит Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>.

\*\*Шпинель – природный минерал MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [6], в котором двухвалентные катионы Mg<sup>2+</sup> занимают тетраэдрические позиции в кристаллической кубической решетке, а трехвалентные катионы Al<sup>3+</sup> – октаэдрические позиции; известна и структура «обращенной шпинели».

Другим интересным фактом является область несмешиваемости оливиновой фазы, наблюдаемая при низких температурах (табл. 2). Обе оливиновые фазы состоят главным образом из смешанных MgMn, CaMg и CaMn силикатов с небольшой долей богатых кальцием силикатов. С учетом известного факта полиморфизма

силикатов кальция следует полагать, что получаемый агломерат будет иметь более высокую прочность и менее склонен к рассыпанию.

Содержание галаксита ( $MnAl_2O_4$ ) и монооксидной фазы практически остается постоянным во всем температурном диапазоне (рис. 1, табл. 2). Эта монооксидная фаза (MeO) практически полностью (92–96 %) представлена MnO с небольшой долей FeO и MgO (рис. 3).

### 3. Расчет термодинамического равновесия для состава АМ-2

Результаты расчета термодинамического равновесия фаз промышленного агломерата Ам-2 для температур 900–1300 °С показаны в табл. 3 и на рис. 4–6.

Обращает внимание, что здесь уже нет распада оливиновой фазы на две (хотя она остается основной) и появляется также тетрагональная шпинельная фаза (гаусманит). В оливиновой фазе ведущими компонентами являются  $MnMnSiO_4$ ,  $MnCaSiO_4$ ,  $CaMnSiO_4$ ,  $MnMgSiO_4$ ,  $CaMgSiO_4$ ,  $CaCaSiO_4$ ,  $MnFeSiO_4$ . Соотношение оливиновой фазы к MeO намного больше (10 : 1), чем в исходной шихте (2 : 1), содержание жидкой фазы (шлак) почти в 2 раза меньше, но ее состав не сильно отличается (рис. 4). Так же, как и выше, весь фосфор концентрируется в жидкой фазе.

В монооксидной фазе немного больше железа, чем для исходной аглошихты, но в целом она представлена MnO (рис. 5). Для шпинельной фазы (рис. 6 – основные компоненты) ведущими являются гаусманит и ферроманганит  $FeMn_2O_4$ . В табл. 4 показано оценочное распределение элементов между этими фазами по результатам расчетов.

### 4. Анализ распределения элементов между минеральными фазами – растворами и минеральными образованиями в марганцевом агломерате АМ-2 по данным РСМА

Объектом рентгеноспектрального анализа был марганцевый агломерат приведенного

Таблица 3

Равновесное содержание фаз (% масс.) для агломерата АМ-2 (табл. 1, № 6)

T (°C)	Шлак	MeO	Оливин	T-Шпинель	Галаксит
900	1,31	6,45	80,37	6,40	5,47
950	1,33	6,50	80,36	6,34	5,47
1000	1,99	6,69	79,65	6,22	5,44
1050	2,03	6,81	79,62	6,13	5,42
1100	2,05	6,95	79,60	6,00	5,39
1150	2,07	7,16	79,58	5,82	5,37
1200	2,09	7,57	79,57	5,43	5,34
1250	2,11	7,95	79,55	5,08	5,30
1300	2,14	8,33	79,53	4,74	5,26

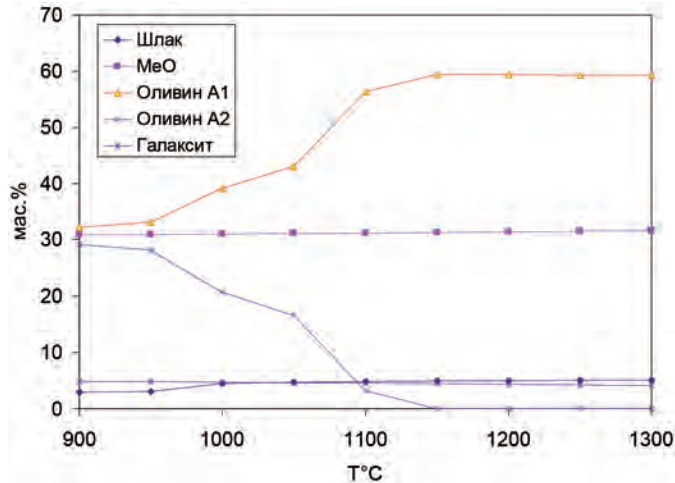


Рис. 1. Изменение фазового состава аглошихты при нагреве до 1300 °С

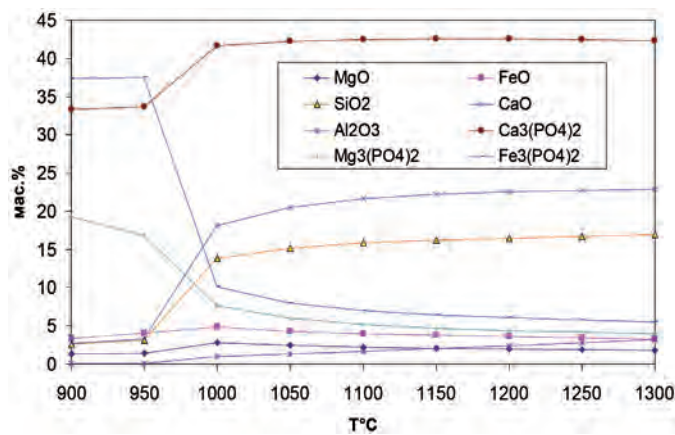


Рис. 2. Состав жидкой фазы для аглошихты при нагреве до 1300 °С

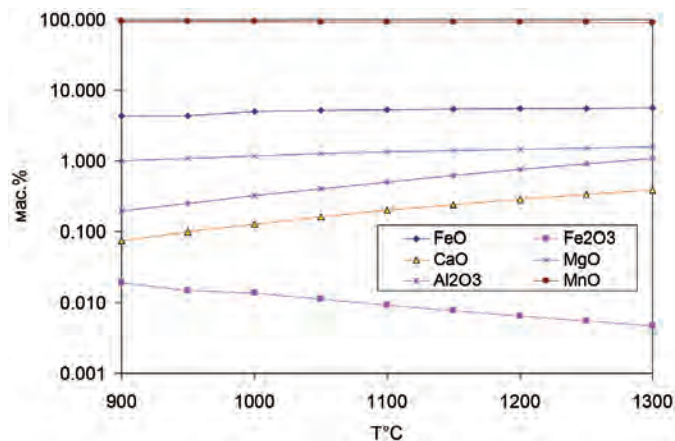


Рис. 3. Состав монооксидной фазы аглошихты (% масс., логарифмическая шкала) при нагреве до 1300 °С

## ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ

в табл. 1 химсостава. Полученные РСМА-зондированием результаты выявленных минеральных образований на шлифе агломерата промышленного производства представлены в табл. 5.

Сформировавшиеся в процессе промышленного спекания аглошхты минеральные образования в агломерате сорта АМ-2, как и микроструктура его в целом, естественно, не могут характеризоваться как равновесные. Вместе с тем, как будет показано ниже, с определенной достоверностью может быть получена взаимосвязь выявленных РСМА минеральных образований сложного состава в структуре агломерата АМ-2 с предсказуемым компьютерным моделированием термодинамически равновесных фаз как при нагреве (спекании) агломерационной смеси концентратов, так и при термической обработке промышленного агломерата АМ-2 в интервале температур 900–1300 °С.

Составы зондированных двух из шести минеральных фаз агломерата (спектры 1 и 5 в табл. 5) с повышенным содержанием Р, Са, Si и ограниченным меньшим содержанием Mn, по сравнению с высокомарганцевыми фазами, можно отнести к предсказуемой моделированием термодинамически равновесной минералогической фазе «жидкая фаза» (шлак).

Составы фаз с высоким содержанием марганца (спектры 3, 4 и 6) могут быть идентифицированы минералогической термодинамически равновесной фазой «монооксид». К «оливиновой фазе», включающей растворы  $Mg_2SiO_4 - Ca_2SiO_4 - Mn_2SiO_4 - Fe_2SiO_4$  и другие ортосиликаты, можно отнести минеральные образования (спектр 2) с повышенным содержанием Mg, Са, Mn, Fe. Кроме индивидуальных приведенных ортосиликатов, к «оливиновой фазе» относятся также минеральные фазы сложного состава, которые эквивалентны природным минералам: оливину  $(MgFe)_2SiO_4$ , монтичеллиту  $(CaMg)SiO_4$ , кирштайниту  $(CaFe)_2SiO_4$  и др.

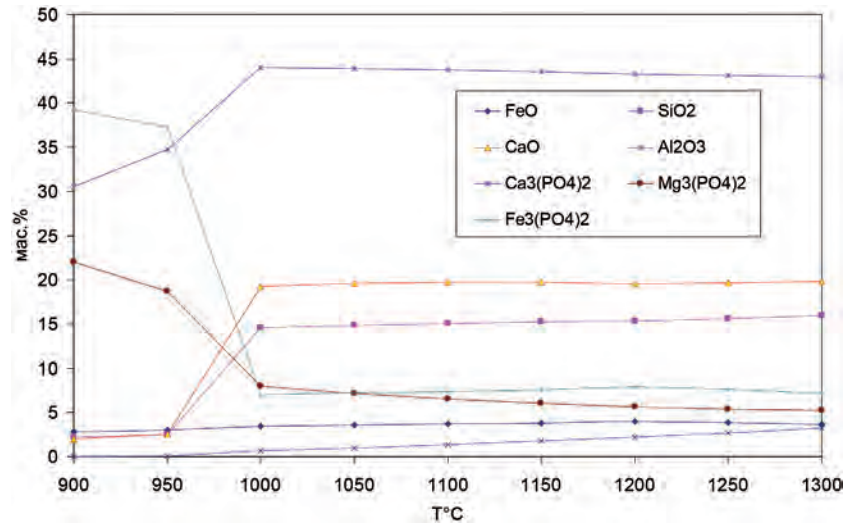


Рис. 4. Состав жидкой фазы агломерата АМ-2 при нагреве до 1300 °С

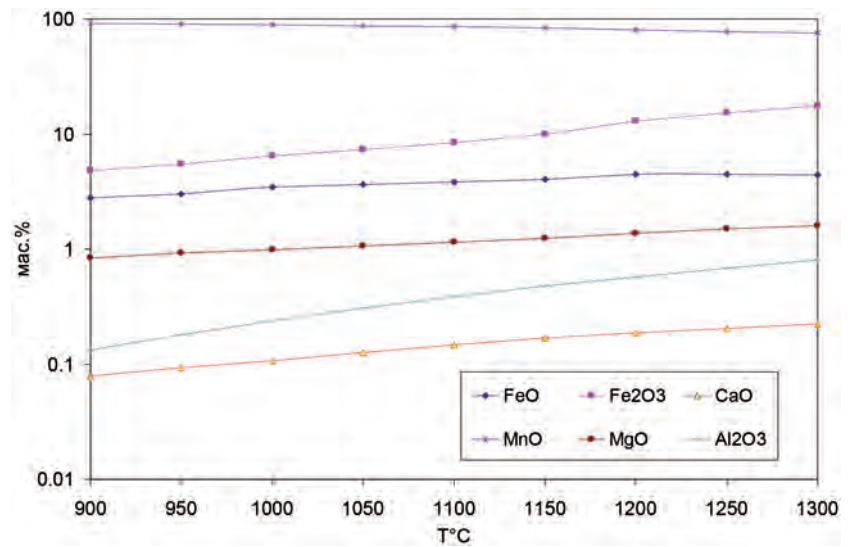


Рис. 5. Состав монооксидной фазы агломерата АМ-2 (% масс., логарифмическая шкала) при нагреве до 1300 °С

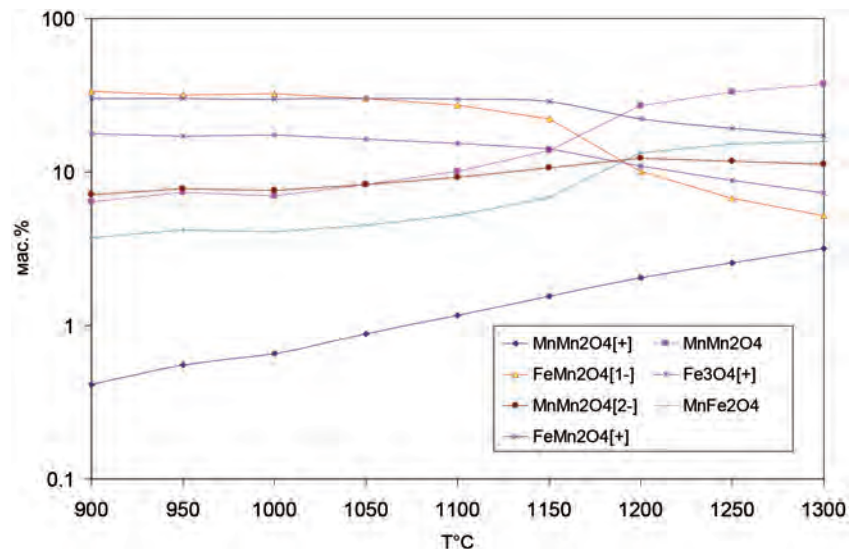


Рис. 6. Состав тетрашпинельной фазы агломерата АМ-2 (% масс., логарифмическая шкала) при нагреве до 1300 °С

Оценочное распределение элементов между фазами АМ-2 (баланс-кислород до 100 %) в интервале 900-1300 °С

Элемент	Жидкая фаза		MeO		Оливиновая фаза		Тетрагональная шпинель	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
Fe	5,95	18,16	5,66	15,63	0,95	1,26	19,20	30,73
Mn	-	-	58,40	70,57	44,67	45,08	41,44	52,92
Ca	14,86	31,04	0,05	0,16	4,67	5,22	-	-
Si	0,90	7,48	-	-	14,44	14,47	-	-
Al	0,03	1,95	0,12	0,49	-	-	-	-
Mg	2,60	7,04	0,49	0,95	1,71	1,74	-	-
P	10,98	18,41	-	-	-	-	-	-

Таблица 5

Химсоставы минеральных образований в структуре марганцевого агломерата АМ-2 БОАФ

Порядковый номер спектра	Содержание элемента, % масс.													
	O	F	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	S
1	43,28	-	1,52	0,40	2,21	21,41	0,46	0,19	2,0	7,96	0,33	18,94	0,68	100,0
2	36,24	4,59	-	2,63	14,68	-	-	-	2,06	-	39,80	-	-	100,0
3	28,47	2,12	-	0,38	0,64	0,90	-	-	-	0,35	-	64,47	2,17	100,0
4	30,08	3,22	-	1,93	-	11,70	-	-	-	2,01	-	51,06	-	100,0
5	41,06	2,05	1,15	1,02	1,55	18,57	0,39	-	1,79	5,57	0,24	26,08	0,53	100,0
6	27,83	3,85	-	0,93	0,72	5,89	-	-	-	1,20	-	57,87	1,71	100,0

Таким образом, несмотря на очевидные кинетические ограничения в процессе агломерации, экспериментальные данные РСМА показывают хорошую корреляцию с предсказанными составами фаз на основании термодинамических расчетов.

**Выводы**

1. Выполнено моделирование термодинамического равновесия фаз при взаимодействии марганцевых концентратов аглошихты и промышленного агломерата АМ-2 производства БОАФ.

2. Получены результаты составов равновесных фаз с использованием модуля «Equilib» программы «FACTSage 6.0» и термодинамических баз данных для различных растворов (жидкий, твердый) в исследованной системе компонентов (MnO, FeO, SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

3. Обоснованы характеристики фаз, принятые для моделирования термодинамического равновесия их: «жидкая фаза», монооксид (фаза твердых растворов), «оливиновая фаза» твердых растворов ортосиликатов, «тетраэдрическая фаза» «нормальной» и «обращенной» шпинели.

4. Исследовано термодинамическое равновесие фаз по данным химсостава агломерата сорта АМ-2 (БОАФ). Установлено отсутствие распада «оливиновой фазы» (типа гаусманита).

5. В «оливиновой фазе» ведущими являются следующие ортосиликаты: Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, MnCaSiO<sub>4</sub>, MnMgSiO<sub>4</sub>. Соотношение «оливиновой фазы» и

«монооксидной фазы» намного больше (~10:1), чем для исходной аглошихты (~2:1).

6. Выполнены экспериментальные исследования распределения элементов между минеральными фазами агломерата АМ-2 с помощью РСМА. Показано, что основные фазы по своему химическому составу хорошо соответствуют предсказанным термодинамическим расчетом (оливиновая, монооксидная и жидкая фазы).

7. Повышение температуры образцов агломерата от 900 до 1300 °С сопровождается изменением количества соответствующих фаз: «жидкой фазы» от 1,31 до 2,14 % (т. е. на 76,32 %); «монооксидной фазы» от 6,45 до 8,33 % (повышается на 29,1 %); «оливиновой фазы» от 80,37 до 79,5 % (т. е. практически не изменяется); «тетраэдрической фазы» от 6,40 до 4,74 % (т. е. уменьшается на 25,9 %).

8. Проведенные исследования показали, что термодинамическое моделирование позволяет предсказать фазовый состав марганцевого агломерата и дает возможность управлять фазовым составом агломерата для обеспечения его оптимальных технологических свойств.

**Библиографический список / References**

1. Грищенко С. Г. Проблемные вопросы развития горно-металлургического комплекса Украины / С. Г. Грищенко, А. Ф. Гринев, Л. Тубольцев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 1. – С. 2–6.

Gryshenko S. G., Grinev A. F., Tuboltsev L. *Challenging questions of development of mining-metallurgical industry in Ukraine*. Metallurgical and Mining Industry. 2017, no. 1, pp. 2-6.

2. Марганцевые руды Украины: монография / Е. Ф. Шнюков, Г. Н. Орловский, И. А. Панченко и др. – К.: Наукова думка, 1993. – 172 с.

Schnukov E.F., Orlovskiy G.N., Panchenko I.A. *Manganese ores of Ukraine*.

3. Кармазин В. В. Магнитные и электрические методы обогащения / В. В. Кармазин, В. И. Кармазин. – М.: Недра, 1988. – 304 с.

Karmasin V. V., Karmasin V. I. *Magnetic and electric methods of enrichment*. Moscow, Nedra, 1988, 304 p.

4. Мостыка Ю.С. Развитие научных основ кинетики мокрой магнитной сепарации слабомагнитных руд: автореф. дис. д-ра техн. наук. / Ю. С. Мостыка – Днепропетровск, НГУ, 2005. – 35 с.

Mostika Yu. S. *Development of the scientific foundations of the kinetics of wet magnetic separation of weakly magnetic ores*. Abstract of thesis of doctor of Technical Sciences. Dnepropetrovsk, NGI, 2005, 35 p.

5. Штрюбель Г. Минералогический словарь / Г. Штрюбель, З. Х. Циммер. – М.: Недра, 1987. – 494 с.

Shtrubel G., Zimmer Z. H. *Mineralogical dictionary*. Moscow, Nedra, 1987, 494 p.

6. Минералогическая энциклопедия / под ред. К. Фрея. – Л.: Недра, Ленинградское отделение, 1985. – 512 с.

Keith Frye (ed.). *The Encyclopedia of mineralogy*. Strouburg. Pennsylvania. 1981, 512 p.

**Purpose.** Thermodynamic modeling of equilibrium of the phase composition of agglomerates during sintering and heating in the temperature range of 900–1300 °C in order to improve the production technology of manganese agglomerate with the involvement of fine-grained concentrate with a high-intensity cut-off of the magnetic separation of the sludge from the spent sludge accumulator.

**Methodology.** A physico-chemical study of the thermodynamics of the equilibrium of mineral phases in multicomponent oxide systems was carried out using the “Equilib” module of the “FACTSage 6.0” program and the “FTOxid” and “FACT” databases in relation to the temperatures of agglomeration manganese concentrates.

**Originality.** Using the basic scientific and methodological approaches to modeling the thermodynamic equilibrium of complex oxide systems with the isolation of solid solutions of the same type, the phase composition of the liquid phase, the monoxide phase, the olivine and tetrahedral phases, and also the galaxite were calculated for the first time. The composition of the phases in the agglomerate obtained by agglomerate sintering was studied and in the finished agglomerate when it was reheated, the correlation between the calculations and the data of the microprobe RSMA of the agglomerate samples was shown.

**Practical value.** The research results obtained in the present work have (along with scientific novelty) practical significance for improving the technology of manganese agglomerate production.

**Key words:** modeling, thermodynamic equilibrium, oxide systems, temperature, manganese agglomerate, X-ray structural microanalysis.

**Рекомендована к публикации  
д. т. н. М. И. Гасиком**

**Поступила 06.04.2017**

