



Цветков И.В.,

НМетАУ

Гасик М.М. /д.т.н./

Хельсинский технологический университет

Гасик М.И. /д.т.н./

НМетАУ

## Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в магнезиальных оливино-пироксеновых силикатных системах

Приведен анализ диаграмм плавкости магнезиальных оливино-пироксеновых силикатных систем. Изложены результаты термодинамического моделирования фазовых равновесий в тернарной системе  $MgO-SiO_2-FeO$  методом минимизации энергии Гиббса с использованием баз данных *FToxid* и *DB09* программы *Fact SAGE 6.2*. Проанализированы составы природных и техногенных магнезиально-силикатных материалов и возможности использования их в сталеплавильном производстве. Ил. 5. Табл. 5. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** дуговая электропечь, эркер, огнеупорная засыпка, выпуск металла, термодинамическое моделирование, фазовые равновесия, природные и технические магнезиально-силикатные материалы

*The analysis of the fusion diagrams magnesian olivine-pyroxene silicate systems. The results of thermodynamic modeling of phase equilibrations in the ternary system  $MgO-SiO_2-FeO$  by Gibbs energy minimization using databases *FToxid* and *DB09* program *Fact SAGE 6.2*. Analyzed the compositions of natural and man-made magnesia silicate materials and the possibility of their use in steelmaking.*

**Keywords:** electric arc furnace, bay window, fire filling, metal production, thermodynamic modeling, phase equilibria, natural and technical magnesium-silicate materials

### Постановка задачи исследования

При выплавке электростали в сверхмощных дуговых печах с эркерным выпуском металла для засыпки канала сталевыпускного отверстия эркера применяются зернистые материалы предпочтительно магнезиально-силикатных оливино-пироксеновых составов. Потребность в материалах для засыпки канала эркера небольшая по сравнению, например, с количеством твердых шлакообразующих компонентов, используемых при внепечной обработке стали, однако к ним предъявляется ряд трудновыполнимых требований.

Анализ литературных данных, патентных описаний свидетельствует, что известно несколько видов материалов для засыпки сталевыпускного отверстия эркера дуговой печи. Вместе с тем наиболее предпочтительным являются магнезиально-силикатные зернистые материалы оливино\*-пироксенового\*\* состава. Новизна и промышленная полезность их применения защищена рядом патентов, преимущественно зарубежных фирм.

В условиях горно-металлургического комплекса нашей страны имеются природные и техногенные магнезиально-силикатные материалы, которые могли бы заменять импортные [1]. Проведение комплексных исследований этих материалов методом термо-

динамического моделирования имеет актуальное значение для научно обоснованного выбора магнезиально-силикатных материалов для сталеплавильного производства.

### Анализ известных составов засыпок для сталевыпускного отверстия эркера ДСП

Анализ литературных данных химических составов импортных засыпок подтверждает, что чаще других для засыпки сталевыпускного отверстия эркера дуговой электросталеплавильной печи применяют смеси марок «OLIVINA FILL» (47,8 %  $MgO$ , 42,0 %  $SiO_2$  и др.), «DALPOR QPFO» (60,57 %  $MgO$ , 25,78 %  $SiO_2$ , 1,88 %  $Al_2O_3$ , 5,36 %  $Fe_2O_3$ , 1,89 %  $CaO$  и др.). Минеральный состав этих засыпок в первом приближении можно оценить по результатам анализа фазовых равновесий в бинарной  $MgO-SiO_2$  и тернарной  $MgO-SiO_2-FeO$  системах.

Фазовые равновесия в системе  $MgO-SiO_2$  представлены на рис 1. Исходные оксиды  $MgO$  и  $SiO_2$  плавятся при температурах 2825 °С и 1728 °С соответственно, что существенно выше средней температуры сталеплавильных процессов, принимаемой за 1600 °С. В системе существуют два химических соединения  $2MgO \cdot SiO_2$  (56,52 %  $MgO$  и 43,48 %  $SiO_2$ ) с температурой конгруэнтного плавления 1890 °С и  $MgO \cdot SiO_2$  (39,39 %  $MgO$  и 60,61 %  $SiO_2$ ) с температурой инконгруэнтного (перитектического) плавления 1557 °С. В частной системе  $MgO-2MgO \cdot SiO_2$  известна эвтектика (состава 64 %  $MgO$  и 36 %  $SiO_2$ ) с температурой 1860 °С. Вторая эвтектика существует в частной системе  $MgO \cdot SiO_2-SiO_2$  (38 %  $MgO$  и 62 %  $SiO_2$ ) с температурой 1543 °С.

\* Aalto University, School of chemical Technology (Хельсинский технологический университет, факультет материаловедения)

\* Оливин (Olivin) назван по оливко-зеленому цвету, - породообразующий минерал, магнезиально-железистый силикат с формулой  $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$ . Содержание Fe и Mg варьирует между двумя конечными членами непрерывного изоморфного ряда оливинов: форстеритом  $Mg_2[SiO_4]$  и фаялитом —  $Fe_2[SiO_4]$ .

\*\* Пироксены — группа цепочечных силикатов вида  $(Mg, Fe)_2[Si_2O_6]$

Таблица 1. Химические составы магнезиально-силикатных материалов, используемых для засыпки сталевого отверстия эркера [6-8]

| Тип  | Марка продукта                           | Массовая доля, %   |                                |                                |                                |                  |       |
|--|--|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|
|  |  | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO   |
| MgO-SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                       | Стартовая смесь LEV 5                    | min 50   | max 2                          | -                              | max 8                          | min 30           | max 2 |
| MgO-SiO <sub>2</sub>   | OLIVIA FILL НА ОСНОВЕ ОЛИВИНА            | 47,2   |                                |                                |                                | 42,1             |       |
| MgO-SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                       | THERAMER FILL 226 ПРОИЗВЕДЕНА ИЗ ОЛИВИНА | 48,3   | 0,5                            | 7,4                            |                                | 42,4             |       |
| MgO-SiO <sub>2</sub><br>(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | OLIVIN                                   | 45-51  | 1,8-2                          | 0,6                            | 7-8                            | 40-45            | 0,6   |
| MgO-SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                       | DALPOR QPFO-40/GLC                       | 60,75  | 1,88                           | -                              | 5,36                           | 25,78            | 1,89  |
| MgO-SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                       | INTERFULL CR 33C                         | В качестве сырья используются MgO и MgO-SiO <sub>2</sub> (периклаз и оливин) |                                |                                |                                |                  |       |
| MgO-SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                       | SCHIEBERSAND CR 33 C                     | В качестве сырья используются MgO и MgO-SiO <sub>2</sub> (периклаз и оливин) |                                |                                |                                |                  |       |
| MgO-SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                       | Смесь стартовая для электропечи «ССЭП-1» | 46,0   |                                |                                | 11,0                           | 35,0             | 1,0   |
| MgO-SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                       | СС-46-Э                                  | Основной составляющей (99-100 %) является дунит. Не менее 46 % MgO           |                                |                                |                                |                  |       |

Химическому соединению 2MgO·SiO<sub>2</sub> в природе соответствует минерал форстерит\*. Структура форстерита образована изовалентными тетраэдрами [SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>] и внедренными между ними ионами Mg<sup>2+</sup>. Теплота плавления форстерита Лпл. = 58,52 кДж/моль. При плавлении объем форстерита увеличивается на 3 % отн. Теплота образования форстерита из оксидов по реакции 2MgO+SiO<sub>2</sub> = 2MgO·SiO<sub>2</sub> равна ΔH<sub>298</sub><sup>0</sup> = - 63,20 кДж/моль.

В отличие от форстерита метасиликат магния MgO·SiO<sub>2</sub> имеет четыре полиморфные модификации: энстатит, протоэнстатит, моноклинный клиноэнстатит и высокотемпературный клиноэнстатит. Положение этих полиморфных форм метасиликата приведены на рис. 1 [2].

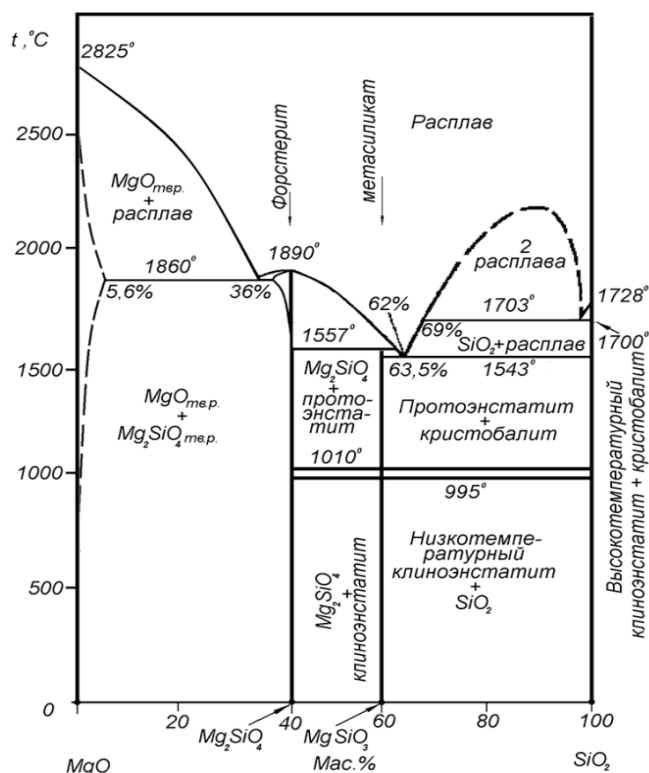


Рис. 1. Диаграмма состояния системы MgO-SiO<sub>2</sub> [2]

\* Форстерит (Forsterit) назван в честь лондонского коллекционера и торговца минералами Форстера (1739-1806 г.г.), оливин магниевый Mg<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>], конечный член ряда оливина[3]

**Характеристика плавкости минералов группы оливина и пироксена в трехкомпонентной системе MgO-SiO<sub>2</sub>-FeO**

Большинство информации по составам материалов засыпок сталевого отверстия эркера дуговой электросталеплавильной печи относится к сухим огнеупорным массам разных марок (табл. 1) [2, 6-8].

Материалы засыпок по данным литературных источников и сертификатов имеет следующий зерновой состав 0-6 мм; 2-5 мм с ограничением фракции 0-2 мм. Определенный рассевом фракционный состав для засыпки Magnofill BT 2-5 приведен ниже:

| Фракция, мм | 5,0-7,0 | 3,0-5,0 | 1,5-3 | 1-1,5 | 0-1 |
|-------------|---------|---------|-------|-------|-----|
| %           | 9,8     | 8,1     | 61,6  | 19,3  | 1,2 |

Результаты определения фракционного гранулометрического состава свидетельствуют, что сумма фракций 1-1,5 мм и 0-1 мм составляет 20,5 %, что не согласуется с литературными данными по ограничению 0-2 мм.

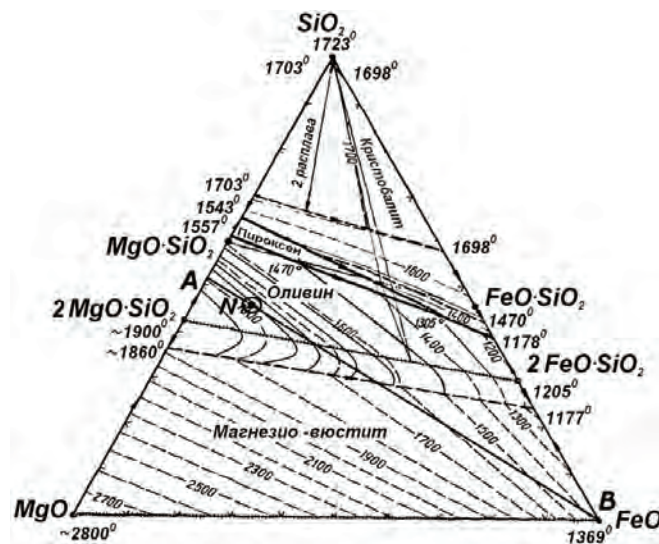


Рис. 2. Диаграмма состояния системы MgO-SiO<sub>2</sub>-FeO, где ⊙ - узкая концентрационная область, соответствующая химическим составам засыпок сталевого отверстия эркера дуговой электропечи

С целью определения возможности использования природных и техногенных магнезиально-сили-

катных материалов в качестве огнеупорных засыпок канала эркера ниже приведен анализ диаграмм фазовых равновесий и плавкости оливиновых и пироксеновых составов в системе MgO-SiO<sub>2</sub>-FeO (рис. 2).

Как отмечалось выше, к оливиновой группе относят минералы имеющие формулу (Mg, Fe)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]. Крайними членами изоморфного ряда являются форстерит 2MgO·SiO<sub>2</sub> и фаялит 2FeO·SiO<sub>2</sub>. Как форстерит, так и фаялит в природе в чистом виде практически не встречаются, так как при их выделении из магматических расплавов, находящиеся в расплаве магний и железо, способны неограниченно взаимно замещать друг друга в решётке оливина. В зависимости от химсоставов форстерит-фаялитовых кристаллов плотность, твердость и плавкость их изменяется в определенных интервалах.

Особенностью тернарной диаграммы равновесного состояния MgO-SiO<sub>2</sub>-FeO является отсутствие в ней тернарных соединений и большое концентрационное поле магнезиовюстита (Mg<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>)O. Поле оливинов, примыкающее к верхней стороне поля магнезиовюстита, оконтурено линиями 2MgO·SiO<sub>2</sub>-2FeO·SiO<sub>2</sub> и MgO·SiO<sub>2</sub>-FeO·SiO<sub>2</sub>, т.е. оливиновое поле сменяется пироксеновым, и последнее, областью существования несмешивающихся двух жидкостей и твердым кристобалитом.

Анализ данных патентов и производственных сертификатов показывает, что состав рассматриваемых импортных материала соответствует области N (рис. 2) При перемещении по линии АВ через точку N от стороны треугольника MgO-SiO<sub>2</sub> до вершины FeO температура плавления оливинов снижается с 1800 °С при 10 % FeO до 1700 °С при 30 % FeO.

К оливиновой группе относятся также минерал либенбергит (Ni,Mg)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (NiO,MgO·SiO<sub>4</sub>), монтитчеллит Ca,Mg·[SiO<sub>4</sub>] где Mg замещается Fe (до 17 %) и Ca-Mn (до 3 %) образуя железисто-кальциевый оливин Ca,Fe·[SiO<sub>4</sub>].

Учитывая низкое содержание в засыпках CaO дальнейшее рассмотрение фазовых равновесий относится к тройной системе MgO-SiO<sub>2</sub>-FeO. Присутствие в некоторых магнезиально-силикатных засыпках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и других оксидов, влияющих на фазоминеральные образования, обуславливает необходимость термодинамического анализа равновесий в модельной системе MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Математическое моделирование термодинамики фазовых равновесий в магнезиально-силикатной системе с наличием примесных оксидов**

Расчет равновесия минеральных фаз в системе, соответствующей составу импортной засыпки эркера (масс. %: 48,05 MgO; 1,90 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 8,01 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 42,04 SiO<sub>2</sub>), выполнен по методу минимизации энергии Гиббса с использованием баз данных FToxid и DB09 программы FactSAGE 6.2. Исходные массовые доли оксидов приводили к равновесию при 1600 °С и затем повторяли при снижении температу-

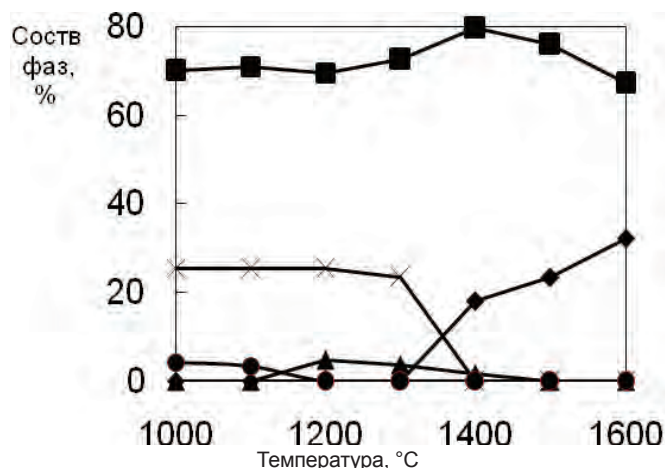


Рис. 3. Изменение фазового состава магнезиально-силикатного материала засыпки в температурном интервале 1000-1600 °С: ■ Оливин; × Ортопироксен; ● Шлак; ▲ Корунд фаза; ▲ Шпинель

ры до 1000 °С с шагом 100°. Для твердых фаз, имеющих несколько подрешеток, рассчитывали полый массовый состав (как нейтральных, так и ионных вкладов компонентов). Данные по результатам моделирования обобщены в табл. 2-5 и представлены на рис. 3-5.

Следует отметить, что в результате моделирования термодинамики фазовых равновесий в определенном температурном интервале установлено существование следующих минеральных фаз. Жидкая фаза (шлак) стабильна выше 1300 °С и занимает 18-33 % общей массы смеси. Шлак представлен главным образом системой MgO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ведущая твердая фаза при всех температурах - оливин (65-80 %), в основном состоящий из Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Фаза шпинель стабильна при 1200-1400 °С и представлена в основном соединениями MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, (Fe,Al)(Fe,Al)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Ортопироксен стабилен ниже 1300 °С и состоит из компонентов Mg<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, Mg(Fe<sup>3+</sup>)<sub>2</sub>SiO<sub>6</sub>, Mg(Fe<sup>3+</sup>)AlSiO<sub>6</sub>, Mg(Fe<sup>3+</sup>)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, Mg<sub>2</sub>(Fe<sup>3+</sup>)SiO<sub>6</sub>, MgAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>·Mg<sub>2</sub>AlSiO<sub>6</sub>. Корунд-фаза существующая в температурном диапазоне 1000-1100 °С, в основном представлена Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (97,7 %), с содержанием оксида алюминия менее 3 %.

Из данных моделирования (табл. 2) следует, что начиная с 1300 °С количество ортопироксена по мере повышения температуры снижается и при 1400 °С эта минеральная фаза исчезает. Вместе с тем начиная от 1300 °С количество фазы-шлак увеличивается,

Таблица 2. Фазовый (минеральный) состав магнезиально-силикатной засыпки

| Фаза         | Массовая доля минеральной фазы, (%) при соответствующей температуре (°С) |       |       |       |       |       |       |
|--------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | 1000   | 1100  | 1200  | 1300  | 1400  | 1500  | 1600  |
| Газ          | 0,04   | 0,09  | 0,18  | 0,29  | 0,49  | 0,57  | 0,56  |
| Шлак         | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 18,02 | 23,38 | 32,18 |
| Шпинель      | 0,00   | 0,00  | 4,77  | 3,79  | 1,83  | 0,00  | 0,00  |
| Ортопироксен | 25,57  | 25,34 | 25,48 | 23,39 | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| Оливин       | 70,06  | 71,06 | 69,57 | 72,53 | 79,66 | 76,05 | 67,26 |
| Корунд-фаза  | 4,33   | 3,51  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |

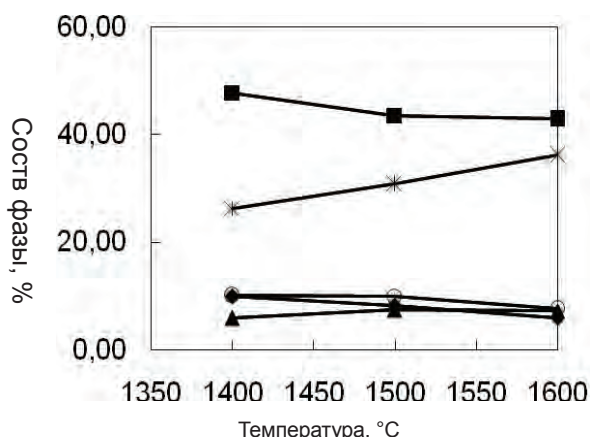
доля ее при 1600 °С 32,18 %. Важно отметить, более высокотемпературная оливиновая фаза в температурном интервале 1000-1400 °С достаточно стабильна, с повышением температуры более 1400 °С содержание ее снижается до 67,26 %. Фаза шпинель (4,77 %) появляется при 1200 °С и исчезает при 1400 °С. Количество корунд- фазы не велико (4,33 % при 1000 °С и 3,51 при 1100 °С).

Представляет теоретический и технологический интерес изменение состава фазы шлака с изменением температуры (табл. 3). Повышение температуры от 1400 до 1600 °С сопровождается обогащением фазы шлака MgO (26,32 % при 1400 °С и 32,25 при 1600 °С) за счет снижения концентрации Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Таблица 3. Изменение химсостава шлаковой фазы при повышении температуры от 1400-1600 °С**

| Оксид                          | Массовая доля оксида, (%) при температуре (°С) |       |       |
|--------------------------------|--|-------|-------|
|                                | 1400   | 1500  | 1600  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,93   | 8,13  | 5,90  |
| SiO <sub>2</sub>               | 47,85  | 43,59 | 42,92 |
| FeO                            | 5,83   | 7,41  | 7,33  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10,07  | 10,02 | 7,59  |
| MgO                            | 26,32  | 30,85 | 36,25 |

Из данных сосуществующих фаз до температу-



**Рис. 4. Влияние температуры на химический состав шлаковой фазы:** ■ SiO<sub>2</sub>; \* MgO; ○ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ▲ FeO; ◆ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ры 1400 °С представляет интерес анализ табл. 4 об изменении химсостава ортопироксена в интервале температур 1300-1400 °С. Ведущими минеральными образованиями сосуществующими в данной обла-

**Таблица 4. Изменение состава фазы ортопироксена при повышении температуры от 1400-1600 °С**

| Силикаты   | Массовая доля компонента в составе ортопироксена, (%) при температуре (°С) |         |         |         |
|--|--|---------|---------|---------|
|  | 1000   | 1100    | 1200    | 1300    |
| MgMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>                               | 42,9337  | 39,1245 | 48,0424 | 45,3947 |
| MgFe <sup>3+</sup> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> <sup>[+]</sup> | 17,7054  | 18,2025 | 15,1008 | 14,0923 |
| MgMgFe <sup>3+</sup> SiO <sub>6</sub> <sup>[+]</sup>             | 8,1677   | 9,0027  | 7,7550  | 7,2229  |
| MgMgAlSiO <sub>6</sub> <sup>[+]</sup>                            | 13,2339  | 12,7565 | 11,2136 | 11,4813 |

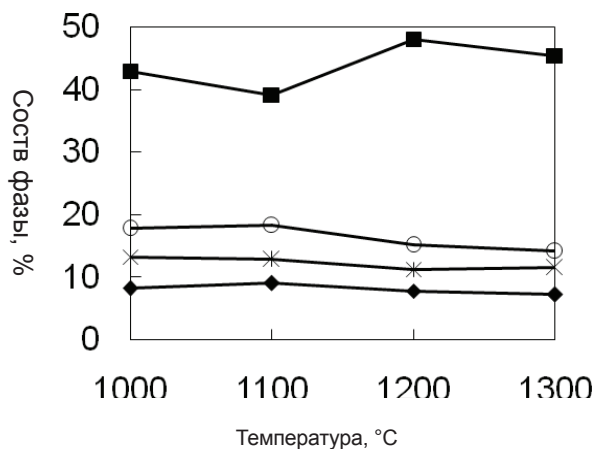
сти температур являются четыре фазы MgMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, MgFe<sup>3+</sup>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub><sup>[+]</sup>, MgMgFe<sup>3+</sup>SiO<sub>6</sub><sup>[+]</sup>, MgMgAlSiO<sub>6</sub><sup>[+]</sup>, остальные фазы термодинамически существуют в малых количествах.

**Таблица 5. Изменение состава фазы оливина при повышении температуры от 1000-1600 °С**

|                      | Массовая доля компонента в составе оливина, (%) при температуре (°С) |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                      | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   | 1500   | 1600   |
| MgMgSiO <sub>4</sub> | 99,141   | 98,036 | 96,319 | 93,843 | 90,489 | 89,561 | 90,690 |
| FeFeSiO <sub>4</sub> | 0,002  | 0,009  | 0,031  | 0,086  | 0,208  | 0,249  | 0,194  |
| MgFeSiO <sub>4</sub> | 0,330  | 0,725  | 1,310  | 2,118  | 3,167  | 3,388  | 2,964  |
| FeMgSiO <sub>4</sub> | 0,528  | 1,230  | 2,340  | 3,952  | 6,137  | 6,802  | 6,152  |

В результате математического моделирования термодинамики равновесия фаз модельного состава импортного засыпочно- зернистого материала установлено, что при температурах жидкой стали в дуговой печи он представлен в основном (65-80 %) твердой оливиновой фазой. Как подтверждено промышленной практикой, фазо-минеральный состав соответствует требованиям функциональных параметров, предъявляемых к материалу для засыпки сталевого отверстия эркера дуговой электропечи, выплавляющей металл-полупродукт с последующим его раскислением, легированием и рафинированием методами внепечных технологий.

Поэтому при выборе природных и техногенных



**Рис. 5. Зависимость химического состава фазы ортопироксена от температуры:** ■ MgMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; \* MgMgAlSiO<sub>6</sub><sup>[+]</sup>; ○ MgFe<sup>3+</sup>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub><sup>[+]</sup>; ◆ MgMgFe<sup>3+</sup>SiO<sub>6</sub><sup>[+]</sup>

материалов для засыпки сталевого отверстия эркера дуговой печи наряду с определением их исходного химического и минералогического состава необходимо методом математического моделирования термодинамики равновесия фаз определить изменение фазового состава в условиях нагревания до средних температур выплавки металла перед выпуском его из дуговой электропечи. По предварительной оценке в качестве засыпочных материалов могут быть использованы концентраты обогащения талько-магнезито-ва руд Правдинского месторождения (Приднепровье) магнезиально-силикатные отвалы шлаки выплавки богатого ферроникеля на ПФК

из импортной никелевой руды с высокомагнезиальной пустой породой.

**Выводы**

1. Выполнено аналитическое исследование химического и гранулометрического составов магнезиально-силикатных зернистых материалов используемых в электросталеплавильном производстве для засыпки сталевыпускного отверстия эркера сверхмощных дуговых электропечей нового поколения.

2. Установлено, что в качестве материалов для засыпки сталевыпускного отверстия эркера применяются предпочтительно оливино-пироксеновые магнезиально-силикатные виды сырьевых материалов.

3. Проведен анализ плавкости минеральных фаз бинарных и тернарных магнезиально-силикатных систем  $MgO-SiO_2$  и  $MgO-SiO_2-FeO$ .

4. Выполнено математическое моделирование термодинамического равновесия всех сосуществующих фаз в магнезиально-силикатных системах сложного исходного минерального состава групп оливина и пироксена методом минимизации энергии Гиббса с использованием баз данных FToxid и DB09 лицензированной программы Fact SAGE 6.2. в широком температурном интервале от 1000 до 1600 °С.

5. На модельном химическом составе импортной засыпки методом математического моделирования термодинамики равновесия фаз установлено, что жидкая минеральная фаза (шлак) формируется свыше 1300 °С, а ортопироксеновая фаза равновесная до 1300 °С и исчезает при нагревании свыше 1400 °С. Основная твердая фаза оливина стабильна во всем исследованном температурном интервале от 1000 до 1600 °С.

6. Результаты математического моделирования термодинамики равновесия фаз в магнезиально-силикатной системе  $MgO-SiO_2-FeO$  с примесными оксидами представляет собой разработанный метод физико-химического анализа природных и техногенных  $MgO$  - содержащих материалов для оценки возможности использования их в качестве засыпочных материалов для сталевыпускного отверстия эркера дуговых электропечей.

7. Разработанный метод может быть рекомендован для предварительной материаловедческой оценки природных и техногенных материалов, какими являются концентраты обогащения талько-магнезитовых руд Правдинского месторождения (Приднепровье), магнезиально-силикатные отвалыные шлаки выплавки богатого ферроникеля из импортной никельсодержащей руды с магнезиальной пустой породой и др.

**Библиографический список**

1. Термодинамический анализ процессов восстановления кремния из магнезиально-силикатного пироксенового расплава углеродом с получением форстеритового материала и ферросилиция / И.В. Цветков, М.М. Гасик, М.И. Гасик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2013. - № 2. С. 26-30.

2. Исследование и совершенствование составов и свойств металлургических порошков для засыпки каналов шибера сталеразливочных ковшей: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.16.02 / Г.А. Ребинский. - Липецк, 1999. - 16 с.

3. Бережной А.С. /Многокомпонентные системы окислов : монография /; АН УССР, Ин-т общ. и неорг. химии. - К.: Наукова думка, 1970. - 544 с.

4. Штрьубель Г., Циммер З.Х. / Минералогический словарь. - М.: Недра, 1987. - 494 с.

5. Минералогическая энциклопедия / Под ред. Фрея К.; пер. с англ. -Л.: Недра, 1985. - 512 с.

6. Смесь стартовая СС-46-Э, <http://vtorogp.rosfirm.ru/startovaya-smes-ss-46-pc348878377.htm>

7. Смесь стартовая для электропечи ССЭП-1 ТУ 1593-066-13706960-2007, <http://www.rtpk.ru/products/metallurgy/471>

8. CS5-katalogBOMEX2010-VATROSTALNI-MATERIJALI-RU[1].pdf, <http://www.bomexholding.com/vatroproizvodnja.html>

**Поступила 27.11.2013**



Журнал «МГП»

размещен в интернете с использованием своего  
«старого» доменного имени

**www.metinfo.dp.ua**

вместо

*www.metaljournal.com.ua*